

Riku Varis  
Heikki Luomala

# OULUN ELASTISTEN VAIHTEIDEN SEURANTAMITTAUKSET





Riku Varis, Heikki Luomala

# **Oulun elastisten vaihteiden seurantamittaukset**

Väyläviraston tutkimuksia 18/2019

Väylävirasto  
Helsinki 2019

*Kannen kuva: Riku Varis*

Verkkojulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0982

ISBN 978-952-317-738-3

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. 0295 34 3000



**Riku Varis ja Heikki Luomala: Oulun elastisten vaihteiden seurantamittaukset.** Väylävirasto. Helsinki 2019. Väyläviraston tutkimuksia 18/2019. 87 sivua ja 2 liitettä. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-738-3.

**Avainsanat:** Vaihde, Elastisuus, Monitorointi

## Tiivistelmä

Tässä raportissa keskitytään Ouluun juhannuksena 2016 asennettujen kahden elastisen 1:15,5-vaihteen uusiin rakenneratkaisuihin ja siihen, kuinka vaihteet käyttäytyvät projektille asetetun koejakson aikana. Työn päätavoitteena on tutkia radalla tehtävien mittausten avulla mahdollisimman kattavasti uuden elastisemman vaihderakenteen käyttäytymistä osana rata-rakennetta ja pystyä vertailemaan sitä nykyisen vaihderakenteen toimintaan sekä lyhyellä että pitkällä aikajänteellä.

Raportin luvussa 2 käydään yksityiskohtaisesti läpi Nokelan alueen monitoroitavien koekohteiden ominaisuudet ja elastisten rakenneratkaisujen erot verrattuna nykyiseen vallitsevaan vaihderakenteeseen Suomessa. Muutoksia on tehty niin kiinnitysoosiin, pölkkyihin, vaihteenkääntölaitteisiin ja lukitukseen sekä vastakiskoalueelle. Näistä ratkaisuista useita on kokeiltu jo Kouvolaan asennettujen elastisten 1:9-vaihteiden yhteydessä, joten näiden testien tarkoituksena on osallaan vertailla Oulun rakenteen käyttäytymistä Kouvolan vastaaviin rakenteisiin.

Luvussa 3 esitellään rakenne-erojen vaikutusten havaitsemiseen käytetty mittausjärjestelmä. Mittaaminen keskittyi pääosin radan pystysuuntaisen painumakäyttäytymisen määrittämiseen, sillä uusilla elastisilla rakenneosilla on lähtökohtaisesti suurin vaikutus juuri pystysuuntaisen jouston ja pysyvän painuman määrään. Näitä asioita monitoroitiin sekä pistemäisillä että jatkuvilla mittausmenetelmillä.

Raportin luvussa 4 esiteltävät mittauks tulokset osoittavat, että elastiset osat toimivat rakenteessa hyvinkin odotetulla tavalla jakaen kuormitusta laajemmalle alueelle ja vähentäen näin kuormituspiikkien muodostumista niin kiskoihin, pölkkyihin kuin sepelin pintakerrokseenkin. Palautuva painuma pysyi näiden komponenttien ansiosta suhteellisen muuttumattomana noin 2 vuoden seurantajakson aikana. Lisäksi vaihteiden pysyvä painuma on kehittynyt varsin maltillisesti ja käytännössä on jopa pysähtynyt viimeisten seurantakuukausien aikana. Geometrian muutosnopeus on siis mittauspisteiden kohdalla jopa linjaraidettakin hitaampaa.

Projektin aikana ilmeni kuitenkin myös tiettyjä ongelmia vaihderakenteessa, kuten poikkeavan raiteen kiskojen sivukulumisen sekä kuperien pölkkyjen aiheuttamat kallistuksen arvot vaihteen poikkeavalla reitillä. Kummatkaan näistä ongelmista eivät kuitenkaan johdu suoranaisesti vaihteen uudesta elastisesta rakenteesta, vaan samoja ongelmia on todettu myös vanhoissa vaihderakenteissa. Kiskojen kulumisilmiötä elastinen rakenne voi tietyissä oloissa kielialueen joustojen lisääntyessä hieman kasvattaa, mutta se ei ole pääsyy sivukulumisen synnylle.

Tulokset osoittivat myös sen, että vaihteisiin suunniteltu uusi kaksijousinen kääntöavustin toimii halutulla tavalla vaihteen kärkialueen kääntämisessä. Vaihteen kanta-alueelle tällainen rakenne ei kuitenkaan ole optimaalinen, vaan siellä voidaan käyttää jo olemassa olevia kiinteällä tangolla olevia kääntöavustimia.

**Riku Varis och Heikki Luomala: Uppföljningsmätningar av elastiska växlar i Uleåborg.** Trafikledsverket. Helsingfors 2019. Trafikledsverkets undersökningar 18/2010. 87 sidor och 2 bilagor. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-738-3.

## Sammanfattning

Denna rapport fokuserar på de nya strukturella lösningarna i de två elastiska 1:15,5-växlar som installerades i Uleåborg midsommaren 2016 och på hur växlarna fungerar under den testperiod som ställdes upp för projektet. Huvudmålsättningen med arbetet är att genom mätningar av banan så omfattande som möjligt undersöka hur den nya mera elastiska växelkonstruktionen fungerar som en del av bankonstruktionen och jämföra den med den nuvarande växelkonstruktionens funktion på både kort och lång sikt.

I kapitel 2 i rapporten går man detaljerat igenom egenskaperna hos testobjekten som monitoreras i Nokelaområdet och jämför skillnaderna mellan de elastiska strukturella lösningarna och den växelkonstruktion som är dominerande i Finland i dag. Ändringar har gjorts på såväl fästelement, syllar, växeldrivare och förreglingen som motrölsområdet. Av dessa lösningar har flera redan prövats i samband med de elastiska 1:9-växlar som installerats i Kouvola, så syftet med dessa test är att få fram hur konstruktionen i Uleåborg fungerar jämfört med motsvarande konstruktioner i Kouvola.

I kapitel 3 presenteras det mätsystem som använts för att studera effekterna av de strukturella skillnaderna. Mätningen fokuserade främst på att definiera den vertikala sättningen eftersom de nya elastiska strukturkomponenterna i princip har störst inverkan just på hur stor den vertikala fjädringen och permanenta sättningen blir. Dessa faktorer monitorerades med både punktformiga och kontinuerliga mätmetoder.

Mätresultaten som presenteras i kapitel 4 i rapporten visar att de elastiska delarna i konstruktionen fungerar långt enligt förväntningarna genom att fördela belastningen på ett större område och således minska uppkomsten av belastningstoppar på såväl räls, sliprar som makadamytskikt. Tack vare dessa komponenter hölls den återhämtbara sättningen relativt oförändrad under uppföljningsperioden på cirka två år. Dessutom har den bestående sättningen i växlarna utvecklats ganska måttfullt och i praktiken till och med avstannat under de senaste uppföljningsmånaderna. Vid mätpunkterna förändras geometrin således till och med långsammare än linjerälsen.

Under projektet uppdagades ändå vissa problem i växelkonstruktionen, exempelvis sidslitage på skenorna på avvikande räls samt överhöjningsvärden som konvexa sliprar orsakade på rutten som avvek från växeln. Ingetdera av dessa problem beror dock direkt på växlens nya elastiska konstruktion, utan samma problem har även konstaterats i gamla växelkonstruktioner. I vissa situationer kan den elastiska konstruktionen öka skenslitagefenomenet något när fjädringarna i tungområdet ökar, men detta är inte huvudorsaken till att sidslitage uppkommer.

Resultaten visade också att den nya dubbelfjädrande vändhjälpen som tagits fram för växlar fungerar på önskat sätt när det gäller att vända växlens spetsområde. För växlens basområde är denna konstruktion dock inte optimal, utan där kan redan befintlig vändhjälp med fast stång användas.

**Riku Varis and Heikki Luomala: Monitoring of the elastic prototype turnout in Oulu.** Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2019. Research reports of the Finnish Transport Infrastructure Agency 18/2019. 87 pages and 2 appendices. ISSN 2490-0982, ISBN 978-952-317-738-3.

## Abstract

This report concentrates on the basic structure and behavior of two new elastic 1:15.5-turnouts, which were installed in Oulu in June 2016. The main goal of this work is to measure that behavior as comprehensively as possible and compare that to the behavior of the conventional turnout structure in the short but also in long time span.

Chapter 2 goes through all the new features of these elastic turnouts and explains the purpose of these changes compare to conventional structure, which is still mainly use in Finland. The changes has been made especially on the fastenings, bearers, point machines and locking systems. Many of these solutions have already been tested in Kouvola, where two elastic 1:9-turnout were installed in 2014. So partly, this project also concentrates to compare the behavior between the elastic long turnouts and the elastic short turnouts.

Chapter 3 introduces the monitoring system, which focuses mainly on measuring the vertical movements of these test turnouts. In principle, the new elastic components have the largest affect just on the vertical deflection and settlement of track so these things were measured on many single points but also with a continuous method.

The results in chapter 4 shows that the elastic components are mainly working as expected. With the help of new elastic rail pads, the loads are shared in bigger area, which decreases the dynamic impact loads in rails, bearers and ballast. The reversible deflection remained quite stable during the two-year monitoring period. In addition, the settlement of track developed rather slowly and was practically zero during the last months of measurement. Therefore, the rate of settlement was actually slower than in line track, which is quite remarkable.

During the project also some difficulties arose in the turnout structure like intense rail side wear in the diverging track and cant problems of the concave long bearers. Still, neither of these problems were directly caused by the elastic structure, because these same issues were also noticed in the conventional turnouts. The new elastic structure can increase the rail side wear in some circumstances, but it is definitely not the main reason for that.

Result also revealed that the new spring device with the two-spring mechanism works out well in the tip of the switch area. However, in the heel of the switch area, that structure does not work and conventional mechanism with one fixed rod should be used.

## Esipuhe

Tämä raportti liittyy Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laboratoriossa, Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä tehtyyn tutkimukseen, jonka Liikennevirasto (nyk. Väylävirasto) on tilannut osana rahoittamaansa Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelmaa.

Tutkimuksen vastuuhenkilönä on yliopistolla ollut Riku Varis ja työtä on ohjannut Heikki Luomala. Liikenneviraston yhteyshenkilöinä ovat toimineet Tuomo Viitala, Tuija Myllymäki sekä Markku Nummelin.

Helsingissä marraskuussa 2019

Väylävirasto  
Ratatekninen yksikkö

# Sisältö

1	PROJEKTIN TAUSTA JA TAVOITTEET .....	8
2	MONITOROINTIKOhteet .....	10
2.1	Kohteiden yleisesittely .....	10
2.2	Oulun elastisen rakenteen ja nykyisen vaihderakenteen erot .....	11
2.2.1	Kääntöavustimet .....	12
2.2.2	Älypölkkyt .....	13
2.2.3	Airjet-puhallusjärjestelmä .....	14
3	MONITOROINTIJÄRJESTELYT KOEVAIHTEISSA .....	17
3.1	Radan palautuvan painuman mittaaminen .....	17
3.1.1	Jatkuva menetelmä .....	17
3.1.2	Pistemäinen menetelmä .....	18
3.2	Radan pysyvän painuman mittaaminen .....	22
3.3	Kiskojen ja risteysalueen kulumisen mittaaminen .....	23
3.4	Kielen ja tukikiskon korkeuseron mittaaminen .....	25
3.5	Pölkkyjen kuormitustilan mittaaminen .....	26
3.6	Kääntöavustimen voimatasojen mittaaminen .....	28
3.7	Muu anturointi .....	29
4	MITTAUSTULOKSET JA ANALYSOINTI .....	30
4.1	Radan palautuva painuma .....	30
4.2	Radan pysyvä painuma .....	41
4.3	Tukikiskojen, kielirakenteen ja risteyksen kuluminen .....	48
4.4	Tukikiskon ja kielen välinen korkeusasema .....	66
4.5	Pölkkyjen kuormitustila .....	67
4.6	Uusien kääntöavustimien voimantuotto ja toiminta koevaihteissa .....	73
4.7	Muut havainnot koevaihteissa .....	80
5	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET .....	82
5.1	Suosituksat jatkotoimille .....	84
	LÄHTEET .....	86
	LIITTEET	
	Liite 1 Anturointisuunnitelma	
	Liite 2 Kulumismittauksen tulokset sekä välikisko- että kielialueelta kaikilta mittauskerroilta	

# 1 Projektin tausta ja tavoitteet

Suomen rataverkolla käytettävien vaihteiden rakenne on nykyisellään melko jäykkä. Elastisia komponentteja käytetään hyvin vähän, jotta pystytään varmistamaan vaihteen kielten liikeratojen pysyvyys ja vaativan geometrian, kuten esimerkiksi vaihteen kielen ja sitä vastaavan tukikiskon keskinäisen korkeusaseman muuttumattomuus junan yliajon aikana. On kuitenkin huomattu, että tämä jäykkyys rasittaa tukikerrosta sekä myös vaihderakennetta ja varsinkin vaihteen raideruuveja (Salminen 2013). Vaihderakenteen jäykkyyden takia tukikerrokseen kohdistuu pölkkyjen kautta merkittävää dynaamista kuormitusta, joka pitkällä aikavälillä hienontaa sepeliä ja heikentää sen tukemiskykyä. Näihin vaihteen jäykkyysvaihteluihin on paneuduttu tarkemmin vuosien 2012-2015 aikana tehdyssä tutkimuksessa, jonka loppuraportti on julkaistu Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä sarjan numerolla 9/2017 (Varis 2017).

Edellä mainittujen tutkimusten ja raideruuvien katkeamisten vuoksi Liikennevirasto aloitti yhteistyökumppaniensa kanssa uuden elastisemmän vaihderakenteen suunnittelun vuonna 2013. Uuden vaihderakenteen suunnittelussa pyrittiin ottamaan huomioon kaikki Suomen nykyisessä 60E1-vaihteessa havaitut ongelmat, jotka liittyvät jäykkyyteen tai kuormituksen lisääntymiseen vaihdealueella. Näiden suunnitelmien pohjalta projektin ensimmäisessä vaiheessa valmistettiin kaksi uutta 60E1-300E-1:9-prototyyppivaihdetta, jotka asennettiin Kouvolan ratapihalle syksyn 2014 aikana. Raportti näiden vaihteiden käyttäytymisestä on julkaistu Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjassa vuonna 2017 (Varis & Luomala 2017).

Näistä lyhyistä vaihteista saatujen hyvien kokemusten takia Liikennevirasto halusi kokeilla tätä samaa elastista rakennetta myös muissa vaihdetyypeissä. Seuraavaksi prototyyppivaihteeksi valikoitui 60E1-900-1:15,5-vaihde, joita asennettiin 2 kappaletta Oulun Nokelaan kesällä 2016.

Kumpikin näistä uusista prototyyppivaihteista sisältää Kouvolan vaihteiden tapaan lukuisia uusia komponentteja, joiden tarkoituksena on lisätä vaihderakenteen pystysuuntaisen jouston määrää ja vähentää näin ollen ratarakenteeseen kohdistuvia ylimääräisiä iskukuormituksia. Uusilla kiinnitysratkaisuilla pyrittiin myös lisäämään vaihteen kykyä vastaanottaa paremmin vaakasuuntaisia kuormituksia. Uusia rakenneratkaisuja ovat esimerkiksi paksummat välilevyt, kiinnityksen kulmakappaleet, kallistetut vaihdepölkkyt pohjaimilla sekä pölkyn sisäiset kääntölaitteet.

Näiden ominaisuuksien lisäksi näissä prototyyppivaihteissa testataan Kouvolasta poiketen myös niin sanottuja älypölkkyjä sekä kielisovitusalueen lumen puhdistamiseen tarkoitettua Airjet-paineilmajärjestelmää. Älypölkkyillä tarkoitetaan pölkkyjä, joiden sisään on valettu pölkyn venymää mittaavia antureita.

Elastisissa vaihteissa käytettävät uudet komponentit perustuvat vahvasti muissa Euroopan maissa käytettyihin komponentteihin, joten kokemusta näiden yksittäisratkaisujen toimivuudesta on jonkin verran olemassa. Suomen seka-liikenne ja itäisen standardin mukainen kalusto aiheuttavat kuitenkin omat erityisehtonsa Suomen rataverkolle, joten näiden komponenttien toimivuutta on testattava myös Suomen rataverkolla ennen niiden laajempaa käyttöönottoa.



Työn päätavoitteena on tutkia mahdollisimman kattavasti uuden elastisen vaihderakenteen käyttäytymistä osana nykyistä ratarakennetta. Työn tavoitteet jakaantuvat esivalmisteluvaiheen tavoitteisiin ja varsinaisen mittauksen ja sen perusteella tehtävän analysoinnin tavoitteisiin.

Esivalmisteluvaiheessa tavoitteena on selvittää Schwihagin kehittelemän uuden vaihteen kääntöavustimen yksityiskohtainen toimintamekanismi sekä kääntymiseen tarvittavat voimat ja siirtymät staattisella analyysillä. Toinen esivalmisteluvaiheen tavoite on määrittää laboratoriotestien avulla uusiin elastisiin vaihteisiin asennettavien älypölkkyjen antureiden kalibrointikertoimet.

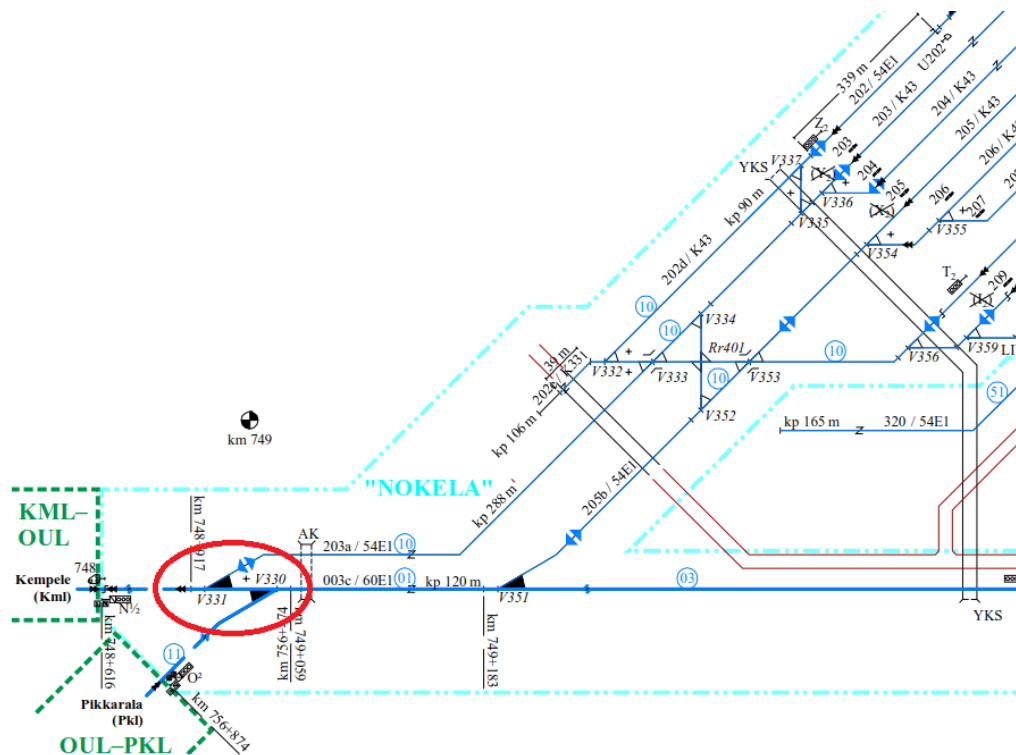
Varsinaisen vaihderakenteen mittaamisen ja niistä saatavien tulosten analysoinnin tavoitteena on vaihderakenteen käyttäytymisen ja kuormituksen jakautumisen selvittäminen sekä yksittäisen junaylityksen aikana että koko elinkaaren näkökulmasta. Näihin tavoitteisiin päästään mittaamalla pystysuuntaisen jouston määrää eri komponenttien välillä ja pohtimalla sen perusteella, miten elastisuus vaikuttaa raidegeometrian pysyvyyteen niin pysty- kuin vaakasuunnassa. Elastisuuden vaikutusta voidaan analysoida myös seuraamalla älypölkkyihin kohdistuvan rasiustilan kehittymistä ajan suhteen sekä suoralla että poikkeavalla raiteella. Samalla myös arvioidaan älypölkyn rakenteen ja sen sisältämän mittaustekniikan soveltuvuus vaihdepölkkyjen erilaisten rasiustilojen luotettavaan mittaamiseen.

## 2 Monitorointikohteet

Kummatkin projektin aikana monitoroitavat vaihteet sijaitsevat Oulun Nokelassa aivan alueen eteläpäässä, jossa rata haarautuu kohti Kempelettä sekä Pikkaralaa. Elastisten prototyyppivaihteiden asennuspaikka päätettiin Liikenneviraston toimesta jo hyvissä ajoin suunnitteluprosessin aikana. Testipaikan valinnassa lähdettiin siitä, että vaihteet tulisi sijoittaa riittävän vaativaan ympäristöön, jolloin testi tuo esille uusien komponenttiratkaisujen todellisen toimintakyvyn. Vaativalla ympäristöllä tarkoitettiin runsasliikenteistä paikkaa, jossa tulisi liikkua sekä raskasta kotimaista kalustoa että raskasta itäisen yhdysliikenteen kalustoa, mutta myös henkilöliikennettä.

### 2.1 Kohteiden yleisesittely

Edellä esitettyjen valintakriteerien perusteella elastisten prototyyppivaihteiden asennuspaikaksi valittiin vaihteet, joiden tunnuksat ovat OL V330 ja OL V331. Näiden kyseisten vaihteiden valintaan vaikutti suuresti myös se, että nämä vaihteet olivat muutenkin jo vaihto-ohjelmassa. Vaihteiden tarkka sijainti on esitetty alla olevassa Oulun Nokelan raiteistokaaviossa (Kuva 1).



Kuva 1. Oulun Nokelan raiteistokaavio. (Liikennevirasto 2018a)

Kuten kuvasta 1 voidaan havaita, kyseessä ovat hyvin merkittävät vaihteet, sillä kaikki Oulusta etelään lähtevät tai etelästä Ouluun saapuvat junat kulkevat näiden vaihteiden yli ja siten ne ovat hyvin raskaasti liikennöityjä. Kummankin vaihteen poikkeavaa raidetta käytetään myös hyvin usein, sillä vaihteen V330 poikkeava raide muodostaa suoraan Kontiomäelle lähtevän pääraiteen ja V331 vaihteen poikkeava raide johtaa suoraan Nokelan ratapihan kaikille raiteille.

Sijainti on siis tietyllä tapaa hyvin kriittinen tämän tapaiselle prototyyppi-testaukselle, sillä vikatilanteiden sattuessa kyseisiä vaihteita ei ole mitenkään mahdollista kiertää. Kuva 2 esittää yleisnäkymää vaihteen V331 kärjestä pohjoisen suuntaan.



Kuva 2. Yleisnäkymä Nokelan vaihdealueesta.

Nopeusrajoitus raiteella 003c on akselipainosta riippuen 100 km/h (>225 kN), 120 km/h (<225 kN) ja 180 km/h (<160 kN), jolloin akselipainojen ohella vaihteiden tulee kestää myös nopeuden tuoma dynaaminen kuormituslisä, jonka vaikutuksia ei pystytty tutkimaan Kouvolan lyhyiden prototyyppivaihteiden kohdalla (Varis & Luomala 2017), jotka sijaitsivat keskellä hitaasti liikennöityä ratapihaa.

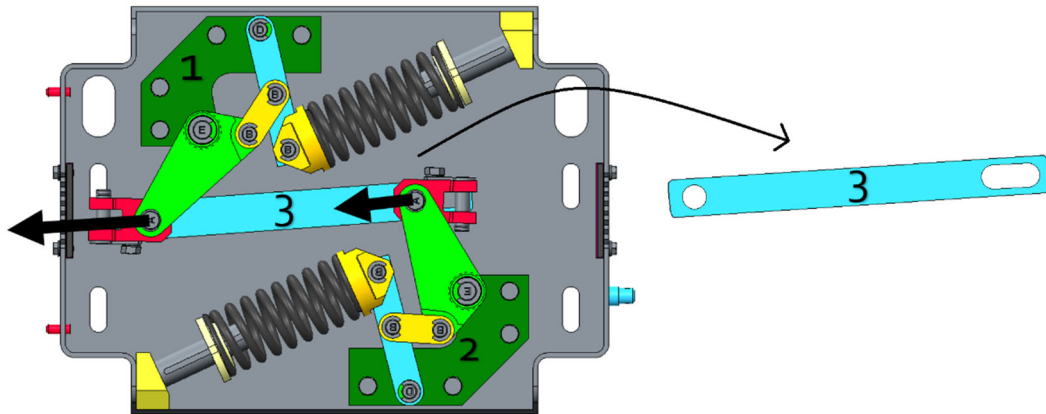
## 2.2 Oulun elastisen rakenteen ja nykyisen vaihderakenteen erot

Tämän monitorointiprojektin pääkohteina olevat vaihteet V330 ja V331 on rakennettu uuden elastisemman rakenteen mukaisesti. Molemmat näistä uusista vaihteista on YV60-900-1:15,5-V -tyypin vaihteita ja ne on asennettu rataa kesäkuussa 2016 korvamaan radassa olleet YV60-900-1:18-V tyypin puupölkkylliset vaihteet, jotka ovat olleet radassa vuodesta 1992 lähtien. Vaihteet ovat siis ikänsä puolesta jo vaihtokuntoisia.

Vaihteet sisältävät paljon uusittuja ominaisuuksia suhteessa normaaliin 1:15,5-vaihderakenteeseen. Suurin osa näistä ominaisuuksista on jo esitelty Kouvolan prototyyppivaihteista kertovassa raportissa (Varis & Luomala 2017), sillä tämä rakenne toimi ymmärrettävästi pohjana pitkän elastisen vaihteen suunnittelulle. Merkittävimmät erot näiden kyseisten vaihteiden ja Kouvolan vaihteiden välillä ovat uusien kääntöavustimien käyttö sekä vaihteiden kärki- että kanta-alueella, Airjet-paineilmapuhallinjärjestelmän käyttö lumen puhdistamisessa sekä älypölkkyjen käyttäminen vaihteen V331 rasiusten seurannassa.

### 2.2.1 Kääntöavustimet

Prototyypivaihteita suunniteltaessa oli jo lähtökohtaisesti päätetty, että niissä tullaan käyttämään tukemisen mahdollistavaa kaukalopölkkyä, Siemensin S700 kääntölaitetta ja sen yhteydessä Schwihagin suunnittelemaa kääntötangostoa ulkoisella vaihteenlukolla, koska näistä kaikista oli saatu hyviä kokemuksia Kouvolasta. Tämän tyyppisen mekaanisen ulkoisen lukon käyttäminen tarkoittaa kuitenkin sitä, että vaihteen kielet liikkuvat käännön aikana hieman eri-aikaisesti. Nykyisissä pitkissä vaihteissa vaihteen kielet liikkuvat lyhyistä vaihteista poiketen aina samanaikaisesti, jolloin niiden välissä pystytään hyvin käyttämään kiinteällä tangolla varustettua Railex-kääntöavustinta sekä kärki-että kanta-alueella. Liikkeen eriakaisuuden takia kiinteä Railex ei kuitenkaan ollut vaihtoehto näihin prototyypivaihteisiin, joten tätä varten Schwihag suunnitteli uuden kahdella erillistangolla toimivan jousimekanismin, jota käytettiin vaihteen V331 yhteydessä. Tämän laitteen perusrakenne on esitettyä kuvassa 3.



Kuva 3. Kahdella erillisellä mekanismilla toimiva kääntöavustin.

Kuvan 3 mukainen tangosto on rakennettu siten, että kumpaakin vaihteen kieltä avustaa oma jousimekanismi (1 ja 2). Lisäksi nämä mekanismit on yhdistetty toisiinsa niin kutsutulla hahlotangolla (3), joka mahdollistaa kummallekin kielelle tietyn pituisen itsenäisen liikkeen kääntötapauhtuman aluksi ja lopuksi. Hahlotangon avulla kielet saadaan liikkumaan tasaisesti ja yhtäaikaaisesti käännön keskivaiheilla ja se huolehtii myös siitä, että avoin kieli jää käännön päätyttyä oikealle etäisyydelle tukikiskosta. Kyseistä kääntöavustinta voidaan käyttää hyvin monien eri vaihteiden kanssa, sillä laitteen tuottama voima on portaattomasti säädettävissä muuttamalla jousen esipuristusmittuutta. Laitteen iskupituutta voidaan myös säätää muuttamalla hahlon pituutta ja vaihtamalla liikettä ohjaavat kolmiokappaleet eri kokoisiksi. Tämä modifiointimahdollisuus on hyvin oleellista, sillä pitkissä vaihteissa kääntöavustimia käytetään aina sekä kielen kärki- että kanta-alueella ja niiden iskupituus ja voimantuottokyky pitää olla erilainen. Tästä syystä Ouluunkin suunniteltiin tästä laitteesta kaksi eri versiota, joista kuvan 3 rakenne esittää kärkialueella käytettyä pidemmän iskun rakennetta. Tämän raportin luvussa 4.6 käydään lisää läpi kyseisen laitteen toimintaperiaatetta ja sen voimantuottokykyä kääntöliikkeen eri vaiheissa.

Uuden kääntöavustimen ohella toisessa prototyypivaihteessa V330 testattiin Voestalpine suunnittelemaa jousivippeä, joka on ollut Suomessa käytössä 1990-luvulla ennen Railex-kääntöavustimien yleistymistä. Tämä laite on myös suunniteltu kahdella erillismekanismin avulla, joten se soveltui sen puolesta käytettäväksi uuden ulkoisen lukon kanssa. Kuva 4 esittää jousivipun rakenteen kiinnitettynä kaukalopölkkyyn.



Kuva 4. Vaihteessa V330 käytettävä jousivippe-kääntöavustin.

Jousivippe on alun perin tarkoitettu käytettäväksi pelkästään lyhyiden vaihteiden kannassa, jolloin laitteen iskupituus on suunniteltu 65 mm pituiseksi. Tämä laite sopii sellaisenaan käytettäväksi pitkänkin vaihteen kannassa, mutta karkialueelle laitetta jouduttiin modifioimaan vaihtamalla siihen pidempi ja jäykempi jousi, jolloin liikepituutta saatiin lisättyä haluttuun 110 millimetriin. Tämän laitteen ja tehtyjen modifikaatioiden toimivuutta käsitellään tarkemmin luvussa 4.6.

## 2.2.2 Älypölkkyt

Pölkkyjen kokemaa kuormitusta on tutkittu, mitattu ja sen avulla laskennallisesti määritetty Suomen rataverkon linjaosuuksilta laajassa Tampereen teknillisellä yliopistolla toteutetussa hankkeessa (Kerokoski et al. 2013, Rantala et al. 2013). Tämä tutkimus ei kuitenkaan ota juuri ollenkaan kantaa vaihdepölkkyjen kokemaan kuormitustilaan, joka on huomattavasti linjapölkkyä monimutkaisempi. Vaihdepölkkyjen pituuden muuttuessa ja kuormituspisteiden liikuessa jokaisella vaihteen pölkkyllä on hieman erilainen kuormitusjakauma ja tästä syystä vaihdepölkkyille on hyvin vaikea muodostaa mitään kaiken kattavaa laskentakaavaa kuormitusten määrittämiseksi.

Näiden kuormitusten määrään eri pölkkyissä voidaan kuitenkin päästä kiinni mittaamalla. Oulun prototyypivaihteissa testattiin ensimmäistä kertaa tähän tarkoitukseen suunniteltuja niin kutsuttuja älypölkkyjä. Tällä termillä tarkoitetaan Parman Railin valmistamia ja Consolis-emyhtiön patentoimia betoni-pölkkyjä, joiden raudoitukseen on betonin valun yhteydessä asennettu kuvassa 5 esitetyjä valokuitutekniikkaan perustuvia antureita. Mittaus perustuu siihen, että betoniin kiinnittyneen anturin metallilaippojen keskinäinen etäisyys muuttuu betonin muokkautuessa, jolloin myös metallirungon sisällä olevien valokuitujen pituus muuttuu. Lähtevän ja palaavan valon aallonpituutta mittaamalla pölkyn taivutukset on siis mahdollista määrittää.

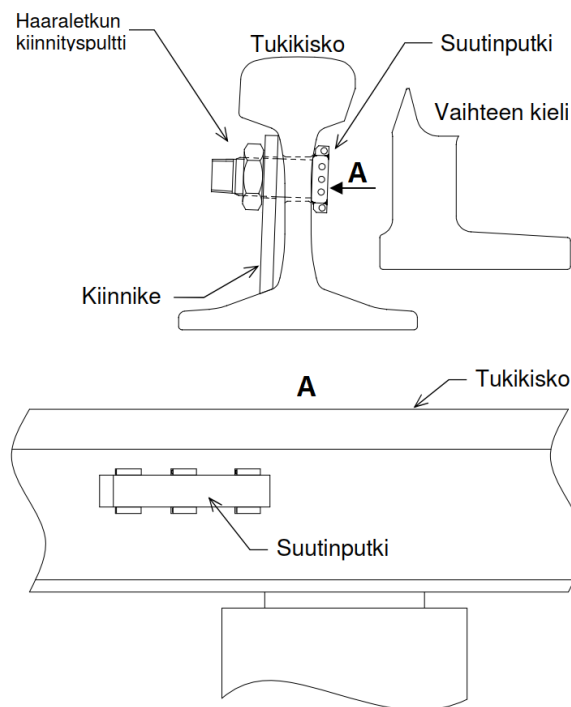


Kuva 5. Pölkyn venymää mittaava valokuituanturi.

Parma Railin emoyhtiö Consolis on valmistanut jo usean vuoden ajan tällaisella valokuitutekniikalla varustettuja linjapölkkyjä tiettyihin testikohteisiin eri puolella Eurooppaa, mutta Ouluun asennetut pölkkyt ovat ensimmäisiä vaihde-älypölkkyjä. Näiden testien avulla on mahdollista saada todella tärkeää ja linjapölkkyihin verrattuna erilaista tietoa siitä, miten kuormitukset jakautuvat esimerkiksi risteysalueella. Älypölkkyjen sijoittelusta vaihteessa, antureiden sijainnista pölkkyjen sisällä sekä mittausjärjestelystä kerrotaan enemmän luvussa 3.5.

### 2.2.3 Airjet-puhallusjärjestelmä

Näiden edellä kuvattujen uusien vaihdekomponenttien lisäksi Oulussa haluttiin testata myös uutta kunnossapitoa helpottavaa Airjet-lumenpuhallusjärjestelmää. Tämä on japanilaisen Nabtesco-yrityksen valmistama laitteisto, joka kerää kompressorin avulla paineistettua ilmaa valmiiksi paineilmasäiliöön ja puhalttaa tarvittaessa tämän paineilman vaihteen kielen suuntaan tukikiskoon kiinnitettyjen suutinten (kuva 6) kautta noin 10 barin paineella. Tämän nopean ja voimakkaan paineiskun on tarkoitus poistaa lumi ja muun vieras materiaali (seveli, roskat, ym.) vaihteen kielen ja tukikiskon välistä ja ennaltaehkäistä kielen pääteasentoon lukittumisen häiriöitä.



Kuva 6. Airjet-järjestelmän suuttimen rakenne tukikiskoon kiinnitettynä. Kuva muokattuna lähteestä (Kinugasa et al. 2015).



Järjestelmä on asennettu Ouluun testivaiheessa normaalin vaihdelämmityselementtien rinnalle, mutta tulevaisuudessa sitä olisi mahdollista testata myös ilman vaihteen lämmitystä, jolla saavutettaisiin kustannushyötyjä. Kuva 7 esittää kompressorin ja paineilmasäiliön laitteistotilaa sekä kuva 8 paineilma-putkiston eri osia itse vaihteessa.



Kuva 7. Paineilmasäiliön ja kompressorin laitteistotila ulkoa ja sisältä vaihteen V331 vieressä.



Kuva 8. Paineilmasuuttimet ja -letkut vaihteessa V331.

Edellä olevista kuvista 7 ja 8 voidaan havaita, että kyseinen laitteisto vie kohtalaisen paljon tilaa sekä vaihteen ympäristöstä että itse vaihdalueeltakin. Valmistajan ohjeen (Kinugasa et al. 2015) mukaan kuvan 8 paineletkut pitäisi irrottaa kesänkauden ajaksi, jotta ne eivät altistuisi liialle auringon valolle, joka saattaisi murentaa letkun. Lisäksi valmistaja suosittelee, että letkut tulisi asentaa hieman tukikerroksen pinnan alapuolelle, joka myös turvaa niitä ulkoisilta rasituksilta. Oulussa letkut on kuitenkin asennettu pinta-asennuksena, eikä niitä poisteta kesänkauden ajaksi, joka saattaa vaikuttaa negatiivisesti letkujen käyttöikänsä. Valmistaja suosittelee letkujen vaihtamista viiden vuoden välein.

Airjet-järjestelmän kompressorit ja ohjausventtiilit ovat yhdistetty suoraan automaattiseen logiikkaan, jonka avulla voidaan määritellä tarkasti puhallusten ajankohta. Puhallukset voidaan ohjelmoida tapahtuvaksi ennaltaehkäisevästi suoraan kellonaikaan perustuen tai ulkoisen signaalin ohjamana, joita on esimerkiksi vaihteen kääntötapaukset ja junan ohitus. Kääntötapauksesta saatava asentotietosignaali on järjestelmälle itseasiassa pakollinen, sillä paineilma tulee ohjata aina vain vaihteen auki olevan kielen ja tukikiskon väliin, jotta paineisku ei pääse vaurioittamaan tai siirtämään kiinni olevaa kieltä, joka on tässä asennossaan aivan suuttimien vieressä. Kyseessä on siis lähtökohtaisesti ennaltaehkäisevä järjestelmä, mutta se pystyy toimimaan myös korjaavana järjestelmänä, joka automaattisesti puhalltaa ilmaa tukikiskon ja auki olevan kielen väliin, jos kääntötapaukset jäävät väliin ja asentotieto jää saamatta vieraiden esineiden tai lumen takia.

Tämä projektin tavoitteena ei ollut arvioida Airjet-järjestelmän toimivuutta, joten sen varsinaiseen toimintavarmuuteen ei oteta kantaa tässä raportissa.

### 3 Monitorointijärjestelyt koevaihteissa

Oulun elastisten vaihteiden vaikutuksia ratarakenteen toimintaan on tässä projektissa monitoroitu usealla eri tavalla. Monitoroinnin pääpaino on selkeästi radan pystysuuntaisen painumakäyttäytymisen selvittämisessä, joka nähtiin projektin alussa merkittävimmäksi muuttujaksi. Pystysuuntaisen painumakäyttäytymisen lisäksi vaihteista monitoroitiin myös kiskojen kulumista, kiskojen poikittaissuuntaista liikettä sekä vaihteenkääntölaitteiden ja kääntöavustimien tankojen liikeratoja, jotta pystytään varmistamaan uusien laitteiden turvallinen toiminta. Seuraavissa alaluvuissa kerrotaan yksityiskohtaisemmin näistä monitorointijärjestelyistä.

#### 3.1 Radan palautuvan painuman mittaaminen

Yksi merkittävimmistä rakenteen jäykkyyden arviointikeinoista on radan palautuvan painuman mittaaminen. Radan palautuvalla painumalla tarkoitetaan radan pystysuuntaista liikettä kuormituksen alaisena, joka palautuu, kun kuorma on ylittänyt kyseisen mittauskohdan. Tällä niin sanotulla radan joustolla on suora yhteys radan jäykkyyteen ja jouston liiallinen kasvu vaihteen elinkaaren aikana indikoi näin ollen myös radan yleisen kunnon heikkenemistä. Tällä palautuvalla painumalla on hyvin suora yhteys myös radan pysyvään painumaan, jonka mittaamisesta kerrotaan lisää kappaleessa 3.2.

Radan palautuvaa painumaa voidaan mitata sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä. Koska ratarakenteen palautuvan painuman mittaaminen on hyvin olennainen asia radan jäykkyyden arvioinnissa, mittaus päätettiin toteuttaa kummallakin näistä menetelmistä.

##### 3.1.1 Jatkuva menetelmä

Radan palautuvan painuman jatkuva mittaaminen toteutettiin TTY:llä kehitellyn jäykkyydsmittalaitteen avulla, josta on olemassa sekä kuvan 8 mukainen kevyen akselipainon (14 tonnia) versio että useammalla yksiköllä varustettu raskaaman akselipainon (22,5 tonnia) versio.





Kuva 9. TTY:llä kehitetty radan palautuvaa painumaa mittaava laite.

Kyseistä mittaustapaa on hyödynnetty useissa aikaisemmissa projekteissa, joissa on kerrottu tarkemmin mittausrakenteiden toimintaperiaatteesta (Luomala et al. 2015) (Luomala et al. 2017).

Mittalaitteella tehtiin yhteensä 3 mittauksia, joista ensimmäinen toteutettiin syksyllä 5.10.2016. Tällöin mittaamiseen käytettiin raskaan akselikuorman (22,5 t) versiota. Loput kaksi mittauksia suoritettiin logistisista syistä kevyemmällä 14 tonnin akselipainolla 17.10.2017 ja 1.8.2018. Kaikki mittaukset toteutettiin siis syksyllä, jolloin niiden antamia arvoja voidaan suoran vertailla toisiinsa ratarakenteen ollessa vuodenaikavaihtelujen johdosta samassa tilassa.

### 3.1.2 Pistemäinen menetelmä

Jatkuvaan mittaukseen kykenevän mittalaitteen ohella radan palautuvaa painumaa mitattiin tässä projektissa myös pistemäisellä menetelmällä. Uusissa prototyyppivaihteissa elastisia komponentteja on lisätty sekä kiskon että pölkyn alle, joten painumamuutoksia on mitattava erikseen kiskon ja pölkyn sekä pölkyn ja pohjamaan välistä. Kummatkin näistä mittauksista pystytään toteuttamaan siirtymäanturien avulla.

Pohjamaan ja pölkyn välistä liikettä mitattaessa pölkkyyn kiinnitettävän anturin liikkeitä verrataan tiiviiseen pohjamaan asti kairattavaan referenssitankoon. Riittävän pitkällä (noin 3 m) tangolla voidaan varmistaa, että referenssitaso ei pääse liikkumaan merkittävästi vaihteen käytön aikana. Kuva 10 havainnollistaa kairatangon sijaintia ja siirtymäanturin kiinnitystä pölkyn päähän. Anturilla on tarkoitus seurata pölkyn joustokäyttäytymistä mahdollisimman pitkään, joten pölkkyyn on kiinnitetty myös anturia ja kairatankoa suojaava putki. Anturin ja sen vastinkappaleen asennuksen jälkeen putki suojataan vielä tiivistetyllä kannella.



Kuva 10. Pölkyn pystysuuntaista liikettä mittaavan anturin kiinnike ja sen referenssitasona toimiva kairatanko suojuksineen.

Tämän tyyppisiä antureita asennettiin jokaisessa koevaihteessa yhteensä viiteen eri pölkkyyn, jotka valittiin tasaisesti koko vaihteen matkalta. Ensimmäiset anturit asennettiin vaihteenkääntölaitteen teräskaukalopölkkyyn, jolloin pystytään arvioimaan erikseen tämän poikkeavan pölkkyrakenteen käyttäytymistä rakenteessa. Muut anturit asennettiin normaaleihin pölkkyihin, joiden numerot ovat 117, 140, 164 ja 225. Viimeistä risteyspölkkyä 225 lukuun ottamatta anturit asennettiin aina pölkyn päihin. Risteysalueella anturit asennettiin vuorostaan siten, että toinen anturi sijaitsi suoran reitin puoleisessa pölkky-päädyssä ja toinen anturi risteyskärjen alla, kuten kuvassa 11 on osoitettu.



Kuva 11. Risteysalueen siirtymäanturikiinnitys.



Pölkyn ja kiskon välisen liikkeen mittaamiseksi siirtymäanturien rungot kiinnitettiin suoraan pölkkyyn kiskon jalan läheisyyteen. Kiskon liikettä mittaavat anturit asennettiin samoihin pölkkyihin edellä kuvattujen pölkkyanturien kanssa, jolloin rakenteen kokonaisjousto saadaan määritettyä yksinkertaisesti näiden kahden anturityypin yhteenlasketulla siirtymällä. Pölkkyä 140 lukuun ottamatta pölkyn siirtymäanturit ja kiskon siirtymäanturit ovat käytännössä hyvin lähellä toisiaan, jolloin tämä yhteenlaskettu siirtymä kertoo kohtuullisen realistisen kokonaissiirtymän. Pölkkyssä 140 nämä anturit ovat kuitenkin etäällä toisistaan, sillä kiskon liikettä mittaava anturi (PS5) asennettiin suoran reitin kiskoon ja pölkyn liikettä mittaava anturi (P5) pölkyn päähän poikkeavan reitin kiskon läheisyyteen. Tässä kohdassa yhteenlaskettu siirtymä ei siis anna realistista kuvaa kokonaissiirtymästä. Kuvassa 12 on esitetty kiskon liikettä mittaava anturi sekä sen kiinnitys pölkyn kylkeen.

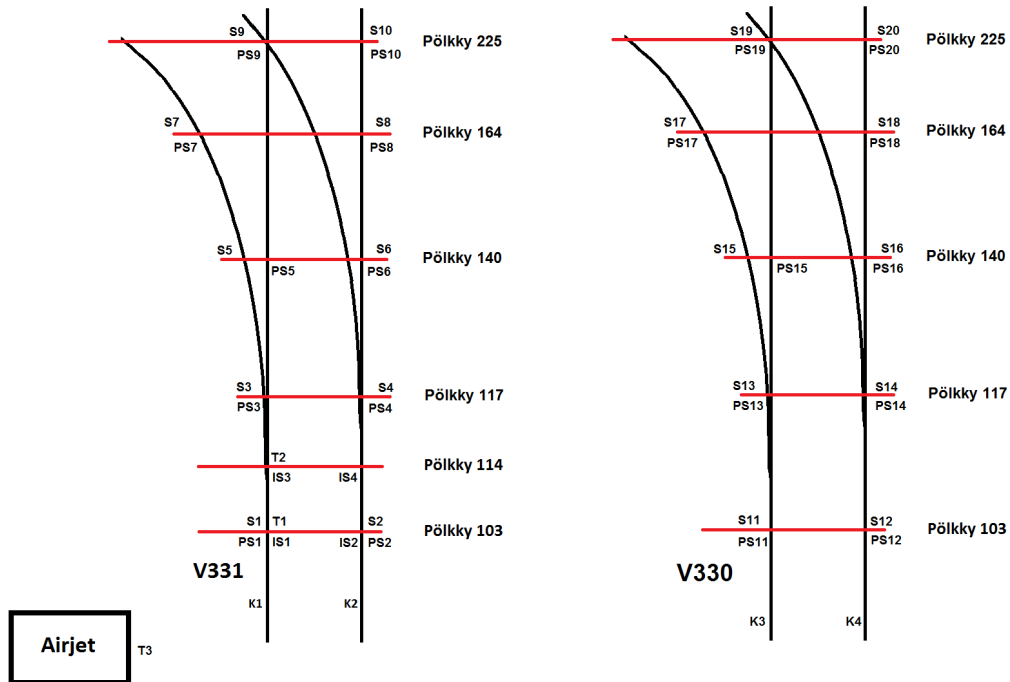


Kuva 12. Kiskon ja pölkyn välisen liikkeen mittaava anturi risteysosan alla.

Sekä pölkkyihin että kiskoihin asennetuilla antureilla pystytään mittaamaan radan palautuva painuma yksittäisen junan yliajon aikana. Kaikki anturikiinnikkeet on kuitenkin suunniteltu siten, että ne pysyvät radassa koko seurantajakson ajan, eivätkä häiritse junaliikennettä. Kiinteät anturit mahdollistavat siten myös radan pysyvän painuman mittaamiseen pitkällä aikajänteellä, johon keskitytään tarkemmin seuraavassa luvussa.

Radan pystysuuntaista käyttäytymistä mittaavia siirtymäantureita asennettiin siis yhteensä 40 kappaletta, joiden lopullinen sijainti näkyy kuvan 13 anturointi-suunnitelmassa sekä Liitteessä 1.





Kuva 13. Koevaihteiden anturointisuunnitelma.

Kuvassa 13 näkyvät S1–S20 kuvaavat pölkyn ja pohjamaan välisiä siirtymäantureita ja PS1–PS20 kiskon ja pölkyn välisiä antureita. Näiden kiinteiden anturien lisäksi palautuvaa painumaa mitattiin jatkuvaan mittaukseen kykenevän vaunumittauksen yhteydessä myös kiihtyvyyssantureilla. Anturit kiinnitettiin vaunun ylityksen ajaksi kiskon jalkaan magneettien avulla, jolloin ne saatiin helposti pystyasentoon. Tämä oli hyvin tärkeää, sillä kyseiset kiihtyvyyssanturit kykenevät mittaamaan kiihtyvyyttä ainoastaan yhdessä suunnassa. Kuva 14 havainnollistaa kiihtyvyyssanturien kiinnitystä vaihteen V331 etujatkoksen alueella.



Kuva 14. Kiihtyvyyssanturimittaus vaihteen V331 etujatkosalueella.

Mittaus toteutettiin yhteensä 16 anturilla, jotka asennettiin kumpaankin kiskoon kiskonkiinnikkeen viereen kiskon ulkopuolelle. Tällä tavoin saatiin siis mitattua radan palautuvaa painumaa yhteensä 8 pölkyn matkalta. Tällainen pienen alueen järjestelmällinen pistemäinen mittaaminen auttaa todella paljon jatkuvaan mittaukseen kykenevän mittalaitteen antamien tulosten absoluuttitason määrittämisessä.

## 3.2 Radan pysyvän painuman mittaaminen

Uusien elastisten komponenttien vaikutusta vaihteiden käyttäytymiseen tulee tarkastella palautuvan painuman muutosten ohella myös pysyvän painuman kautta. Tämä tarkoittaa käytännössä radan absoluuttisen geometrian seuraamista ilman junakuormia. Absoluuttigeometria muuttuu normaalisti hyvin hitaasti, joten mittauksen on perustuttava pidemmän aikavälin seuraamiseen ja analysointiin.

Luvussa 3.1.1 esitelty mittalaite ei pysty määrittelemään pysyvää painumaa, koska sen mittaustekniikka ei perustu absoluuttisen geometrian mittaamiseen. Se mittaa ainoastaan kuormitetun ja kuormittamattoman radan suhteellista geometriaeroa.

Kuten edellisessä luvussa mainittiin, pysyvää painumaa mitattiin pääasiallisesti rataa asennettujen pistemäisten siirtymäanturien avulla. Näitä antureita asennettiin kuitenkin melko harvakseltaan, kuten kuva 13 osoittaa, joten niiden perusteella saadaan vain yleiskuvaus radan painumasta. Tämän tiedon tueksi vaihdealue mitattiin myös jatkuvaan mittaukseen kykenevällä Trimblen GEDO mittavaunulla. Se on Trimblen S9 takymetrin avulla toimiva mittalaite, joka tuottaa radan geometriatietoa moninkertaisella nopeudella verrattuna perinteiseen pistemäiseen takymetrimittaukseen. Laitteella mitataan siis koko raiteen geometriaa, joka sisältää pystysuuntaisen painuman (korkeusaseman) lisäksi myös muita radan tarkastusmittoja, kuten raiteen vaakasuuntaisen aseman, raideleveyden ja kallistuksen. Kuva 15 havainnollistaa mittavaunun rakennetta.



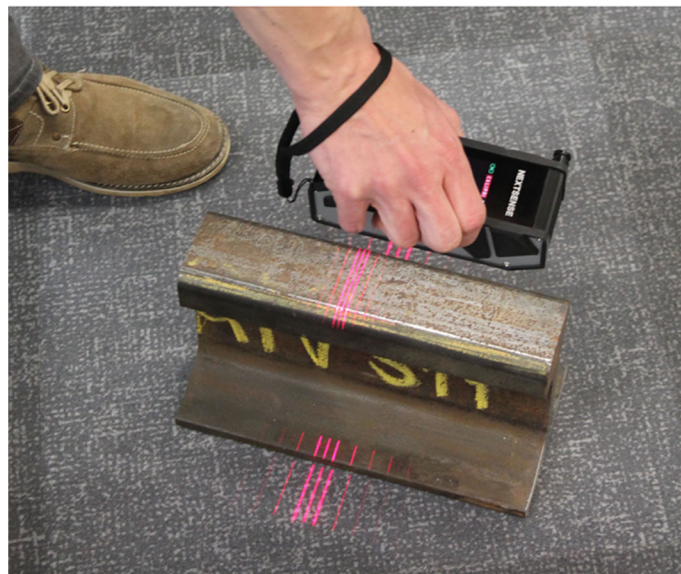
Kuva 15. Trimblen kahteen GEDO-mittausvaunuun perustuva järjestelmä. Kuvan etummainen vaunu sisältää prisman, jota taaaimmaisessa vaunussa oleva takymetri seuraa mittauksen aikana. (Korec 2017)

Kyseinen vaunu saatiin yliopistomme käyttöön vasta kesällä 2018, joten Oulun vaihteet mitattiin perehdytysjakson jälkeen 1.8.2018.

### 3.3 Kiskojen ja risteysalueen kulumisen mittaaminen

Siirtymien ja painumien ohella uusista elastisista vaihteista mitattiin tässä projektissa myös kiskojen, kielten ja risteyskärjen kulumista. Nykyisessä jäykemmässä vaihderakenteessa kulumisen on monesti muodostunut ongelmaksi varsinkin risteyskärjissä ja vaihteen käyrässä kielessä, jolloin niitä joudutaan hiomaan ja vaihtamaan ennenaikaisesti. Uudessa elastisemmassa vaihderakenteessa näitä ongelmia on pyritty pienentämään risteuksen alla käytettävien välilevyjen avulla, joiden tarkoitus on tasata risteyskärjessä syntyvien kuormitusten jakaantumista alapuolisiin rakenteisiin. Näin toimiessaan pölkkyjen ja tukikerroksen kunto säilyy parempana pidempään, jolloin myös risteyskärki säilyttää paremmin asemansa, eikä dynaamiset kuormituskertoimet pääse kasvamaan nykyisen vaihderakenteen tapaan.

Kiskojen, kielten ja risteysalueen kulumista mitattiin kahdella eri laitteella, jotka soveltuvat kummatkin hyvin tiettyihin mittauksiin. Pääosa mittauksista suoritettiin Nextsensen kehittämän Calipri-mittalaitteen avulla, jonka mittaus perustuu laitteen lähettämien lasersäteiden kuvaamiseen kappaleen pinnalla, kuten kuva 16 osoittaa.



Kuva 16. Calipri -lasermittalaite

Laitteen sijainnin ja viivojen keskinäisen etäisyyksien perusteella laite pystyy muodostamaan mitattavasta profiilista pistepilven. Mittaus on siis täysin kosketukseton, joten laitetta voidaan liikutella vapaasti mitattavan profiilin päällä, joka mahdollistaa isompientkin kokonaisuuksien, kuten risteyskärjen, mittaamisen yhdellä kertaa.

Kuten kuvasta 16 voidaan havaita, Caliprin lasersäteitä lähettävä mittalaite on kuitenkin kohtalaisen kookas, joten sillä ei pääse mittaamaan tehokkaasti kieli-  
sovitusalueen ahtaisiin laippavälyksiin, jossa kiskot ovat hyvin lähellä toisiaan. Näiden kiskojen täyden profiilin mittaamiseksi onkin siksi käytettävä Greenwood

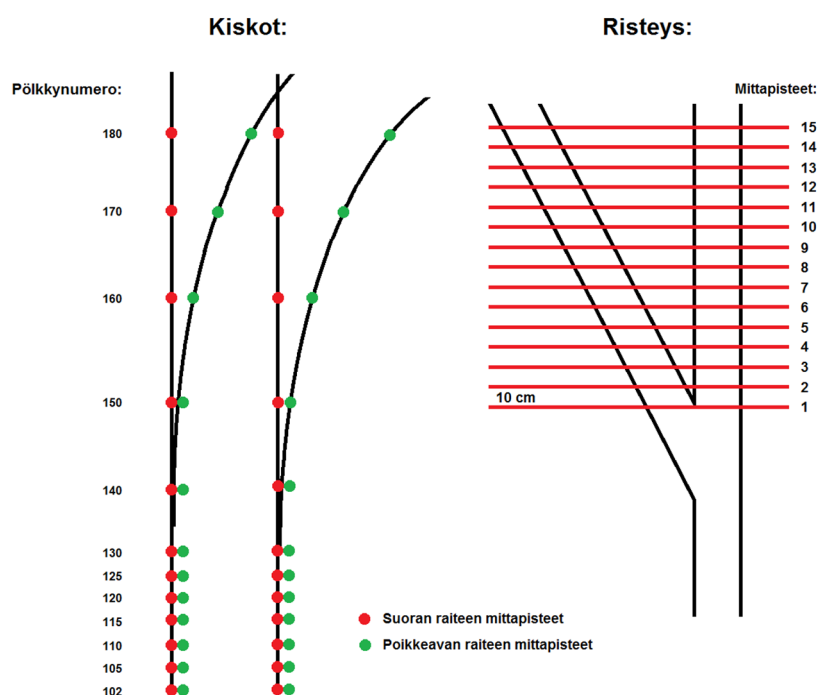


Engineeringin kehittämää Miniprof-laitetta. Miniprof laitteen mittaus perustuu laitteessa olevaan mekaaniseen piirtomittapähkään (kuva 17). Tällä mittapähällä ja siihen yhdistetyllä mekanismilla on mahdollista mitat myös ahtaissa laippavälyksissä. Miniprofilla pystytään siihen liitetystä lisäosista riippuen mittaamaan kiskojen, pyörien tai esimerkiksi junan jarrulevyjen profiilin muotoa. Tämän projektin yhteydessä sitä käytettiin kuitenkin vain näiden vaihteiden ahtaiden kohtien mittaamiseen, sillä Calipri tarjoaa merkittävästi tehokkaampaa mittausta varsinkin risteysalueella, jossa on mitattavana useita leveitä erikoisprofiileja.



Kuva 17. Miniprof Rail -mittalaite.

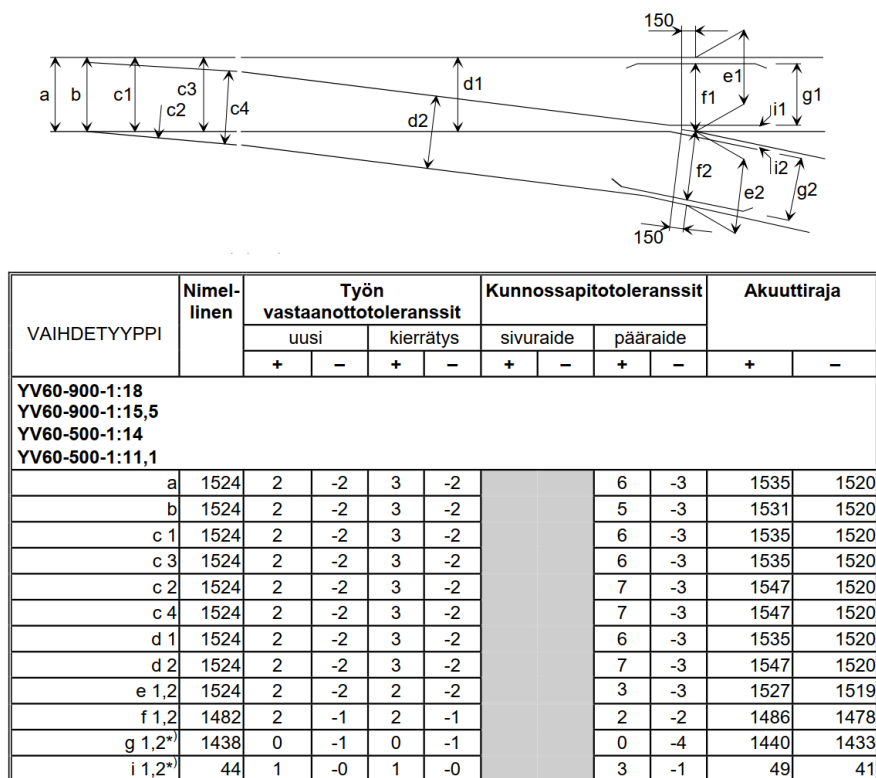
Näiden laitteiden avulla saatiin kaikista koevaihteista mitattua kiskoprofiilit kuvan 18 mukaisista poikkileikkauksista suoralta ja poikkeavalta raiteelta sekä risteyskärjestä. Profiileja mitattiin näin ollen yhteensä 63 kappaletta per vaihde.



Kuva 18. Kiskon kulumismittauksen mittapisteeet.

Kiskojen ja risteysten profiileja mitattiin projektin aikana neljänä eri ajan-kohtana, joista ensimmäinen suoritettiin elastisten vaihteiden asennusurakan jälkeen lokakuussa 2016, seuraava tasan vuoden päästä lokakuussa 2017 ja kolmas elokuussa 2018. Kiskoissa havaitun voimakkaan kulumisen johdosta osa mittapisteistä mitattiin vielä uudelleen marraskuun 2018 lopulla. Näitä tuloksia vertailemalla saadaan arvio kiskojen kulumisvauhdista ja ongelmallisimmista kohdista vaihteissa.

Kulumismäärän analysointi tapahtuu vaihdealueella oikeastaan kokonaisuudessaan vertailemalla vaihteesta mitattuja tarkastusmittoja RATOn osassa 4 (Liikennevirasto 2016) määriteltymiin raja-arvoihin, jotka on esitetty pitkän 1:15,5-vaihteen osalta kuvassa 19.



Kuva 19. Pitkien vaihteiden tarkastusmitat.

### 3.4 Kielen ja tukikiskon korkeuseron mittaaminen

Projektin suunnitteluvaiheessa esitettyjen mittausten lisäksi projektissa toteutettiin myös koekohteelta saatujen kiskon kulumiseen liittyvien kokemusten perusteella ylimääräinen mittaus, jolla määritettiin vaihteen tukikiskon ja vaihteen kielen välisen korkeuseron suuruutta kuormituksen aikana. Tätä korkeuseroa mitattiin Nokelan koevaihteessa V331 sekä referenssinä toimivassa ei-elastisessa rakenteessa Kontiomäen vaihteessa V963 yhteensä 4 siirtymäanturilla, jotka asennettiin kuvassa 20 näkyvällä magneettikiinnikkeellä kiskon jalan alle pölkkyjen 103, 106, 110 ja 112 läheisyyteen.



Kuva 20. Kielen ja tukikiskon korkeuseroa mittaava siirtymäanturi kiinnikkeineen ennen asennusta.

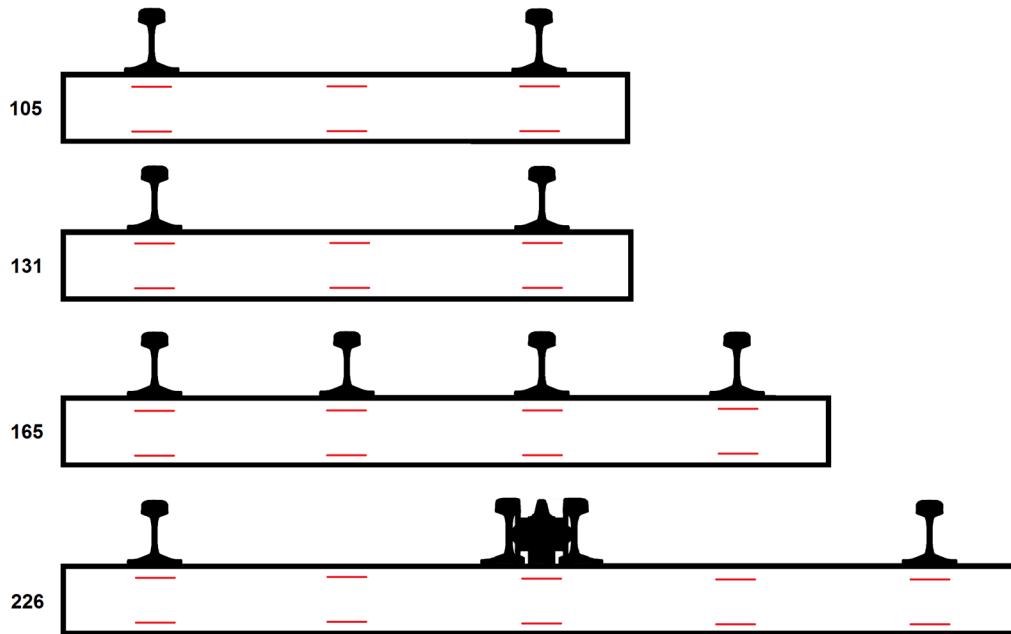
Lisäksi kielen käyttäytymistä kuvattiin pölkkyyn videokameralla, joka kiinnitettiin sepelikerrokseen haudattuun suureen teräspainoon. Tällä tavoin saatiin poistettua melko tehokkaasti kameran oma värinä junan yliajon aikana.

### 3.5 Pölkkyjen kuormitustilan mittaaminen

Yliopiston toimesta asennettujen mittalaitteiden lisäksi Nokelan elastisiin vaihteisiin asennettiin myös neljä Parman valmistamaa älypölkkyä, joiden tarkoituksena on mitata vaihdepölkkyissä tapahtuvia muodonmuutoksia. Nämä neljä älypölkkyä pyrittiin sijoittamaan tasaisesti koko vaihteen matkalle, jotta pystytäisiin seuraamaan vaihteen kuormitustiloja eri vaihde-elementeissä. Ensimmäinen älypölkky asennettiin kielisovitusalueelle ihan vaihteen kärkeen pölkkynumerolla 105. Seuraava älypölkky asennettiin pölkkynumerolla 131, joka on ensimmäinen pölkky, jossa kaikki kiskot ovat kiinteästi kiinni. Kolmas älypölkky asennettiin kohtaan, jossa poikkeavan raiteen ulkokisko kohtaa suoran raiteen keskilinjan. Tämä on siis pölkky numero 165, jossa kaikki 4 kiskoa ovat täysin samalla etäisyydellä (798 mm) toisistaan. Viimeinen älypölkky asennettiin suoraan risteyskärjen alle pölkkynumerolla 226 mittaamaan risteyskärjen siirtymäalueella tapahtuvia rasituksia.

Jokaisessa pölkkyssä anturit asennettiin kiskon kohdalle sekä raiteen keskilinjalle kuvan 21 mukaisesti.

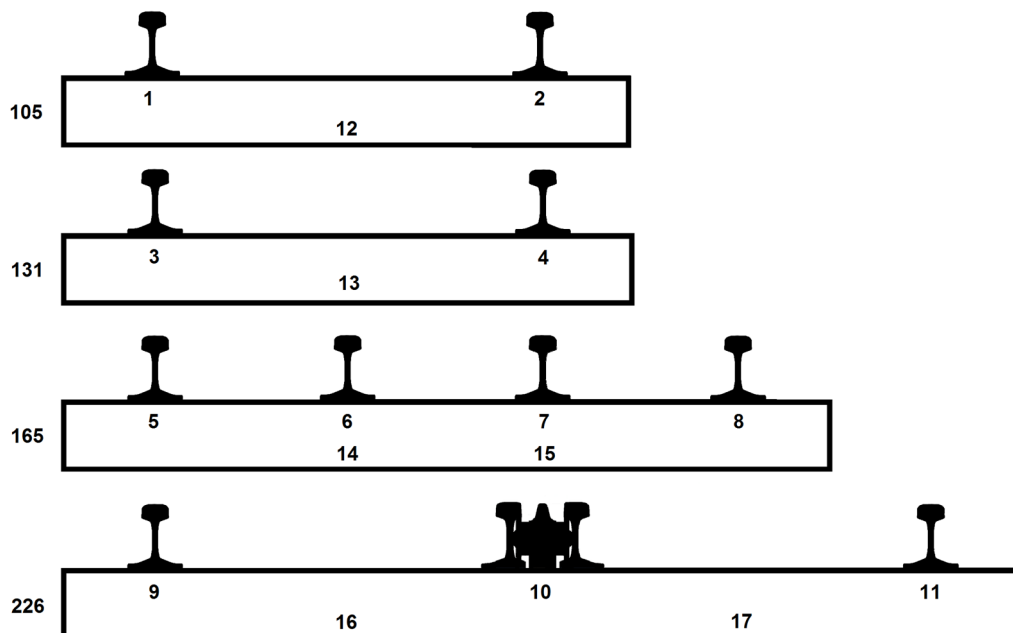




Kuva 21. Älypölkkyjen anturisijoittelu.

Kuvassa 21 näkyvien anturien lisäksi jokaiseen pölkkyyn asennettiin lähelle neutraaliakselia kaksi anturia, jotka teoriassa mittaavat siis pelkästään lämpötilan aiheuttamia muutoksia pölkkyssä. Näin ollen anturien kokonaismäärä mitauksessa oli yhteensä 38 kappaletta.

Projektiin sisältyi näiden antureiden kalibrointimittaukset, jotka suoritettiin heti pölkkyjen valamisen jälkeen 31.5.-1.6.2016 yliopistomme tutkimushallissa. Kalibrointi suoritettiin taivuttamalla pölkkyä tunnetulla voimalla kuvan 22 mukaisista mittauspisteistä.

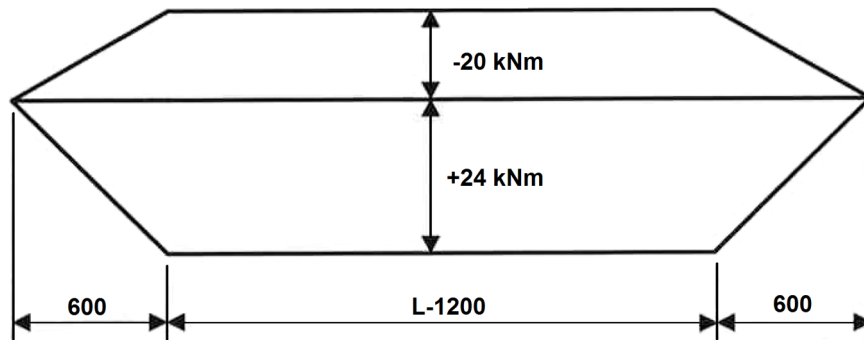


Kuva 22. Älypölkkyjen kalibroinnissa käytetyt mittapisteet

Jokaisen kiskokiinnikkeen kohdalla (1-11) suoritettussa kuormitustesteissä voimana käytettiin  $F = 140 \text{ kN}$  ja taivutuksen jännevälinä  $L = 0,6 \text{ metriä}$ , jolloin kiskon kohdalla oleville antureille luotiin siis momentti  $M_{\max} = 21 \text{ kNm}$  momentti oheisen kaavan 1 mukaisesti.

$$M_{\max} = \frac{1}{4} FL \quad (1)$$

Suoraan kiskon alla olevat anturit kalibroitiin kääntämällä pölkky ympäri ja kuormittamalla pölkkyä pohjasta  $50 \text{ kN}$  voimalla jännevälin ollessa  $1,6 \text{ metriä}$ . Tällöin antureiden kohdalle syntyvä momentti on melkein yhtä suuri, eli  $20 \text{ kNm}$ . Kalibroinnissa oli ensisijaisen tärkeää, että valitut kuormitustasot eivät saa aiheuttaa minkäänlaisia vaurioita näissä pölkkyissä. Toisaalta kalibroinnissa on tärkeää testata myös se, että anturi toimii lineaarisesti koko pölkyn käyttöalueella. Nämä asiat huomioon ottaen päätimme kuormittaa pölkkyä lähelle vaihteiden teknisissä toimitusehdoissa (Ratahallintokeskus 2006a) määriteltyjä käyttörajoja, joka on nähtävillä kuvassa 23.

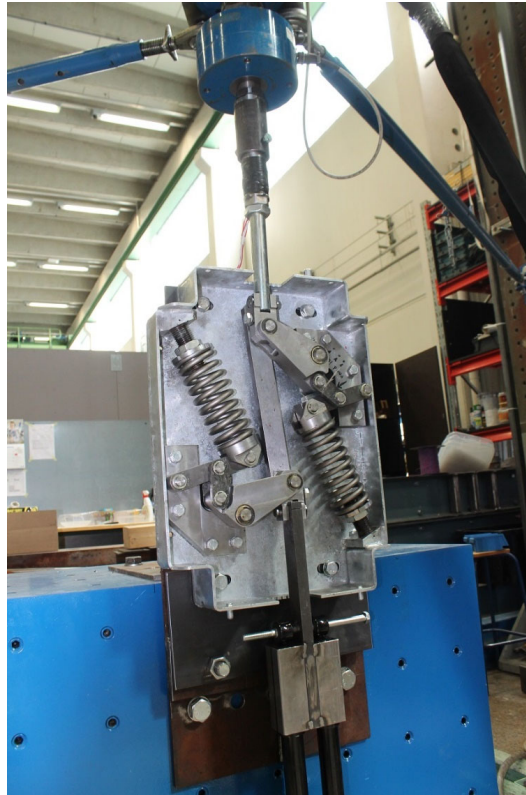


Kuva 23. Vaatimus betonivaihdepölkyn momentinsietokyvyille. (Ratahallintokeskus 2006a)

Kalibrointitulosten perusteella junien aiheuttamat kuormitukset voidaan muuttaa pölkyn kokemaksi momentiksi, joita tarkastellaan luvussa 4.5.

### 3.6 Kääntöavustimen voimatasojen mittaaminen

Kuten luvussa 2.2.1 kerrottiin, vaihteeseen V331 asennettiin uuden tyyppiset Schwihagin valmistamat kahdella jousella toimivat kääntöavustimet sekä vaihteen kärkeen että kantaan, joiden esimerkkirakenne on esitetty kuvassa 3. Tämä projektin alkupuolella toukokuussa 2016 vaihteen kärjessä käytettävän kääntöavustimen voimatasoja ja käyttäytymistä testattiin TTY:n testihallilla kuvan 24 mukaisessa kuormituspenkissä.



Kuva 24. Kääntöavustimen kuormituspenkki.

Kuormitustestien perusajatuksena oli mitata laitteen antama kääntövoima koko liikealueella, joka toteutettiin kiinnittämällä laite voima-anturilla varustettuun hydraulisylinteriin ja ajamalla kääntötangostoa hitaasti ja hallitusti liikealueen päästä päähän. Kääntöavustimen toimintaperiaatteen mukaisesti laitteen kuormitussuunta vaihtuu kääntöliikkeen aikana (kuvan tilanteessa ylhäältä alas), jonka vuoksi penkkiin asennettiin kuvan 24 alareunassa näkyvät mustat vaimentimet. Näin ollen sylinterille ei kohdistu isoja dynaamisia iskuja voiman vaihtaessa suuntaansa. Ilman dynaamisia iskuja voimakäyrälle pystytään saamaan tarkempia ja toistettavampia mittaustuloksia. Näistä mittauksista saatu laitteen voimakäyrä on esitetty ja analysoitu luvussa 4.6.

### 3.7 Muu anturointi

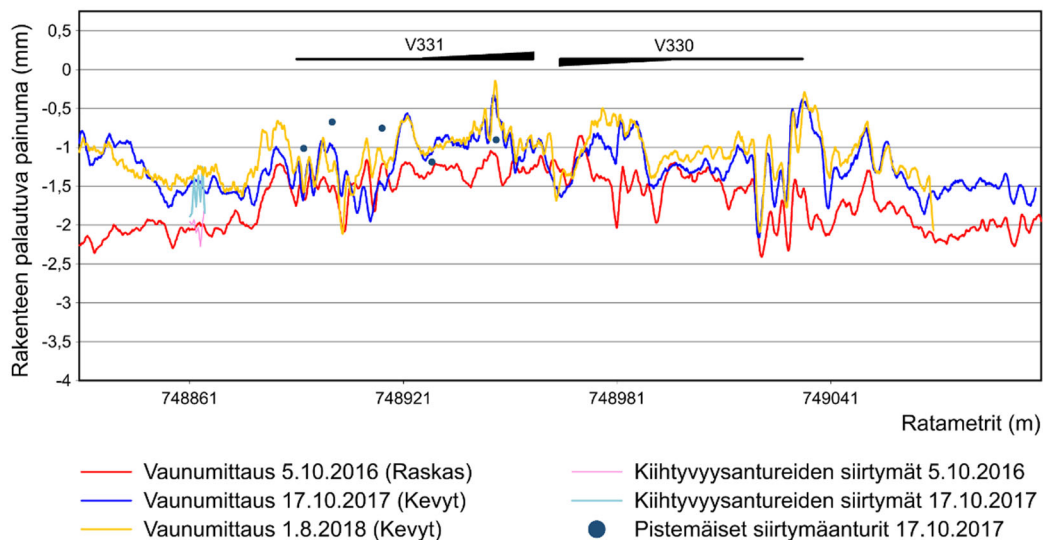
Kuvassa 13 on esitetty pystysuuntaisten siirtymäantureiden lisäksi vaihteenkääntölaitteiden tarkastustankoihin ja kääntöavustimien kohdalla oleviin tarkastustankoihin asennetut siirtymäanturit (IS1–IS3), joiden avulla voitiin varmistaa laitteiden vakaa toiminta sekä kääntötilanteessa että junan ylityksen aikana. Kouvolan elastisten vaihteiden kohteelta oltiin opittu, että kaukalopölkkyt kannattaa varustaa lämmityselementeillä, jotta vältetään lumen ja jään kertymiseltä pölkyn sisälle. Näiden lämmityselementtien toimintaa monitoroitiin lämpötila-antureilla (T1–T3). Koevaihteiden yli menevän liikenteen akselipainoja mitattiin kiskoihin kiinnitetyillä venymäliuskoilla (K1–K4).

## 4 Mittaustulokset ja analysointi

Loppuraportin kirjoitushetkellä (1/2019) elastiset vaihteet ovat olleet radassa noin 2,5 vuotta. Tämä on vaihteiden suunnitellun käyttöiän kannalta hyvin lyhyt ajanjakso, mutta tällä ajanjaksolla on mahdollista tehdä jo tiettyjä havaintoja vaihteiden käyttäytymisestä.

### 4.1 Radan palautuva painuma

Vaihteista mitattiin radan palautuvaa painumaa sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä. Jatkuvan menetelmän mittauksia suoritettiin yhteensä 3 kertaa jäykkyysmittalaitteella, jotka ajoituivat luvun 3.1.1 mukaisesti ajanjaksolle 10/2016–8/2018. Ensimmäisellä mittauksella käytettiin raskasta 22,5 tonnin akselikuormaa, jolla pyrittiin selvittämään vaihteiden elastisuuden lähtötilanne. Jälkimmäiset kaksi mittausta tehtiin kevyemmällä 14 tonnin akselikuormalla, jolloin myös palautuvan painuman voidaan olettaa jäävän hieman pienemmäksi. Kuvassa 25 on esitetty päällekkäin kaikkien kolmen mittauksen tulokset suoralla reitillä. Jatkuvan mittauksen tulosten rinnalla on esitetty myös pistemäisten siirtymäanturien mittaustulokset sekä kiihtyvyyssantureiden avulla saadut painumat jatkuvan mittauksen aikana. Nämä tulokset toimivat tietyllä tapaa kalibrointiarvoina, joiden avulla pystytään asettamaan jatkuvasta mittauksesta saatu käyrä oikealle tasolle.

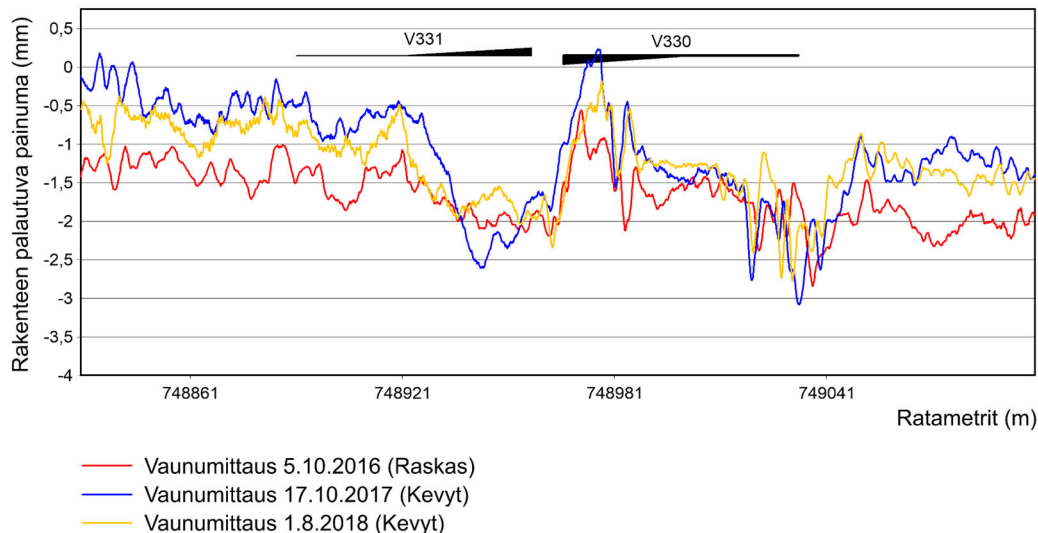


Kuva 25. Jäykkyysmittalaitteella mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteiden suoralla reitiltä välillä lokakuu 2016 – elokuu 2018. Mustat viivat kuvaavat vaihdealuetta vaihteen kärjestä viimeisen pitkän vaihdepölkyn kohdalle.

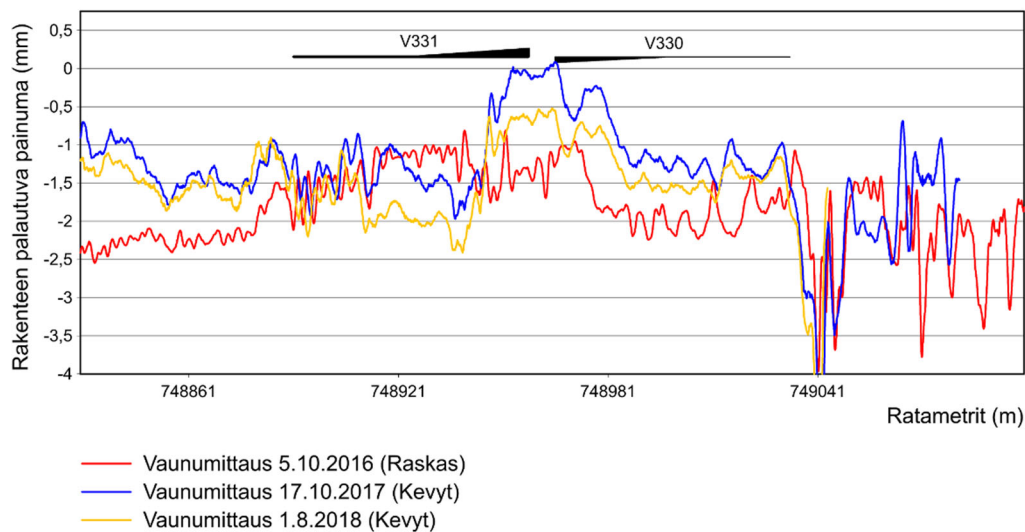
Päällimmäinen huomio koevaihteiden suoran reitin palautuvasta painumasta on se, että vuonna 2016 tehty raskaamman akselipainon mittaus todellakin erottuu kahdesta muusta mittauksesta keskimäärin hieman suuremmalla painumalla. Painumaeroa on varsinkin vaihdealueiden ulkopuolella, mutta vaihdealueella painumaerot selkeästi tasoittuvat eri mittauksen välillä. Tämä johtuu siitä, että raskaan akselikuorman mittauksessa palautuvan painuman taso selkeästi

muuttuu saavuttaessa vaihdealueelle. Linjaraiteella palautuva painuma on keskimäärin noin 2 mm luokkaa, mutta vaihdealueella se on kaikissa kolmessa mittauksissa noin 1,3 mm. Vaihteet ovat siis uusista elastista komponenteistaan huolimatta hieman linjaraidetta jäykempiä. Koevaihteiden ympärillä myös linjapölkkyihin on asennettu pohjaimet noin 50 metriä vaihteista kumpaankin suuntaan, joten niiden vaikutus näkyy tasaisesti koko alueella eikä vaikuta suoranaisesti kuvassa 25 näkyviin eroihin linjaraiteen ja vaihdealueen välillä. Palautuva painuma on kuitenkin kokonaisuudessaan hyvin maltillista ja alittaa selkeästi Väyläviraston antamat palautuvan painuman raja-arvot (Liikennevirasto 2014), joiden mukaan rata saa painua täyden mitoitussakselikuorman alla 4 mm. Vuoden 2016 mittausta voidaan pitää täyden mitoitussakselikuorman tapauksena.

Vaihteiden käyttäytymistä analysoitaessa on hyvä tarkastella myös tilannetta ajettaessa vaihteiden poikkeavalta reitille. Palautuvan painuman arvot kummankin vaihteen poikkeavalla reitillä on esitetty kuvissa 26 ja 27.



Kuva 26. Elastisuusvaunulla mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteen V330 poikkeavalta reitiltä välillä lokakuu 2016 – elokuu 2018. Mustat viivat kuvaavat vaihdealuetta vaihteen kärjestä viimeisen pitkän vaihdepölkyn kohdalle ja paksumpi viiva mitattavaa vaihdetta.



Kuva 27. Elastisuusvaunulla mitatut radan palautuvan painuman arvot vaihteen V331 poikkeavalta reitiltä välillä lokakuu 2016 – elokuu 2018. Mustat viivat kuvaavat vaihdealuetta vaihteen kärjestä viimeisen pitkän vaihdepölkyn kohdalle ja paksumpi viiva mitattavaa vaihdetta.

Kuvista 26 ja 27 huomataan, että mittaustulokset muuttuvat melko paljon siirryttäessä poikkeavalle reitille. Teoriassa mittaustulosten pitäisi näyttää vaihteen kielisovitusalueella ja vaihteen etualueella samoilta, mutta vaihteiden poikkeavan reitin tiukka kaarresäde vaikuttaa jostain syytä varsinkin vuosien 2017 ja 2018 kevyellä akselipainolla tehtyihin mittauksiin. Kaarteen aiheuttamaa virhettä on yritetty poistaa palautuvan painuman mittaustuloksista monilla eri korjauskertoimilla. Se on kuitenkin hyvin hankalaa, koska se vaikuttaa eri mittauseroilla hieman eri verran. Virheen vaikutus näkyy suurimmillaan kuvassa 26 heti vaihteen V330 kärjessä, josta vaihteen kaari alkaa (ratametrit 749+030 – 749+040). Suoran reitin mittauksissa tällä kohdalla on vuoden 2017 ja 2018 mittauksissa hyvin jäykkä kohta (palautuva painuma 0,5 mm), kun taas poikkeavan reitin mittaustuloksen mukaan tämä on ympäröivää rataa joustavampi kohta (palautuva painuma 2,5 mm). Tästä voidaan päätellä, että varsinkin kaarresäteen äkkinaisessa muutoskohdassa mittalaitteen pyörät ei etene aivan samaa reittiä rataa kuormittavan Tka7:n kanssa. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että mittalaitteessa käytetään 500 millimetrin halkaisijalla olevaa pyörää ja Tka:ssa 960 mm halkaisijalla olevaa pyörää. Pienemmällä pyörän halkaisijalla ohjautuvuus on mittalaitteen pyörissä tehokkaampaa, eli tasapainotila kaarteissa muodostuu pienemmällä sivuttaissiirtymällä. Ensimmäisessä vuoden 2016 mittauksessa tällaista kaarteen aiheuttamaa virhettä ei ole havaittavissa, koska raskaalla akselipainolla kaikki mittaaminen tapahtuu mittalaitteen omista pyöristä. Oulun koevaihteissa näillä kulkusäde-eroilla on vielä normaaliakin suurempi vaikutus, sillä kiskot ja kielisovitus ovat olleet koko seuranta-ajan hyvin kuluneita. Tällöin pyörän sivuttaissiirtymä voi muuttaa äkillisesti myös kiskon kontaktikohtaa tai pyörän ja kiskon välistä kontaktikulmaa.

Kuvista 26 ja 27 havaitaan, että tämä kaarresäteen muutoskohdan aiheuttama virhe näkyy myös kummankin vaihteen risteysalueella, jossa palautuva painuma muuttuu hetkellisesti käytännössä olemattomaksi. Kuten kuva 25 osoittaa, tämä ei ole kuitenkaan todellista. Vaihteessa V330 on poikkeavalla reitillä risteysen jälkeen lyhyt suora raideosuus, joka näkyy selkeästi mittaustulosten tasaantumisenä. Tämän jälkeen siirrytään tiukkaan 600 metrin kaarresäteellä olevaan kaarteeseen, joka näkyy kevyen akselipainon mittauksissa jälleen absoluuttitason selkeänä muutoksena. Vaihteen V331 takajatkosalueella on vuorostaan s-kaarre, eli kaarresäde muuttaa heti risteysen jälkeen äkillisesti merkkiään, joka valitettavasti myös vaikuttaa palautuvan painuman tuloksiin ja tekee niistä epäluotettavia. Ratametrillä 749+040 radassa on kisko jatkos, jonka näkyy kaikissa kolmessa mittauksessa voimakkaana palautuvan painuman piikkinä. Kisko jatkoksen kohdalta rata muuttuu puupölkyllyiseksi sivuraiteeksi, joka myös näkyy selkeästi palautuvan painuman arvoissa. Viimeisellä mittauskerralla mittausta ei tämän takia koettu tarpeelliseksi jatkaa kisko jatkoksta pidemmälle.

Kolme eri mittauskertaa yhteensä 2 vuoden aikana kertoo myös mahdollisesta ajan vaikutuksesta radan palautuvaan painumaan. Kuvat 25–27 kuitenkin osoittavat, että rakenteen palautuvassa painumassa ei ole tapahtunut akselipainosta johtuvan eron lisäksi juuri lainkaan muutoksia mittausten välillä. Tähän vaikuttaa tietenkin suuresti myös se, että koko tämä alue tuettiin jo 18.6.2017, eli vain vuosi käyttöönoton jälkeen. Vuoden 2017 mittauksen oltua vasta tämän ajankohdan jälkeen, näistä tuloksista ei pystytäkään arvioimaan, missä kunnossa rata on ollut palautuvan painuman kannalta juuri ennen tukemishetkeä. Oletettavaa kuitenkin on, että suuria muutoksia ei tässä ajassa ehtinyt tapahtumaan. Lisää näistä tukemisen vaikutuksista on kerrottu pistemäisten antureiden analysoinnin yhteydessä luvussa 4.2.

Vaunumittauksessa absoluuttiarvoja kiinnostavampi tieto on palautuvan painuman vaihtelu radan pituussuunnassa, jota on poikkeavan reitin virheiden vuoksi syytä tarkastella suoran reitin mittaussajojen perusteella. Kuten kuva 25 osoittaa, vaihteluväli on koko mittausalueella alle 1 mm luokkaa, eli radan jäykkyydessä ei ole havaittavissa merkittäviä epäjatkuvuuskohtia. Pelkkä palautuvan painuman lukuarvojen muuttuminenkaan ei kuitenkaan ole vielä riittävä keino ratarakenteen kunnan arvioimiseen. Ratarakenteen toiminnan ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta merkityksellistä on myös palautuvan painuman muutosnopeus. Palautuvan painuman arvot voivat siis pysyä hyvinkin RATO:ssa annettujen raja-arvojen sisällä, mutta tilanne voi silti olla kriittinen, jos arvot vaihtelevat hyvin nopeasti esimerkiksi nollan ja maksimi-arvon 4 mm välillä. Tähän radan käytön aikaiseen palautuvan painuman muutosnopeuteen RATO ei ota kantaa millään tapaa.

Kyseistä muutosnopeutta pystytään jollakin tasolla arvioimaan myös suoraan kuvasta 25, mutta se ei ole kovin yksikäsitteistä. Palautuvan painuman muutosnopeuteen päästään paremmin käsiksi määrittämällä palautuvasta painumasta liukuva varianssi  $\delta^2$ . Varianssi kuvaa neliöllisesti palautuvan painuman poikkeamaa keskiarvosta (keskihajonta  $\delta$ ), joka kertoo 5 metrin liukuvana arvona paremmin sen muutosnopeudesta. Varianssin avulla palautuvan painuman muutosta on yksikäsitteisempää analysoida, sillä varianssin perusarvo on hyvällä ja tasaisella radalla teoriassa aina nolla. Eri rataosilta tai eri vaihteista saatuja variansseja voidaan verrata suoraan keskenään ja varianssille pystytään luomaan tämän avulla yksikäsitteisiä raja-arvoja. Suoraan palautuvan painuman millimetrejä tulkitsemalla näiden raja-arvojen löytäminen on hankalampaa.

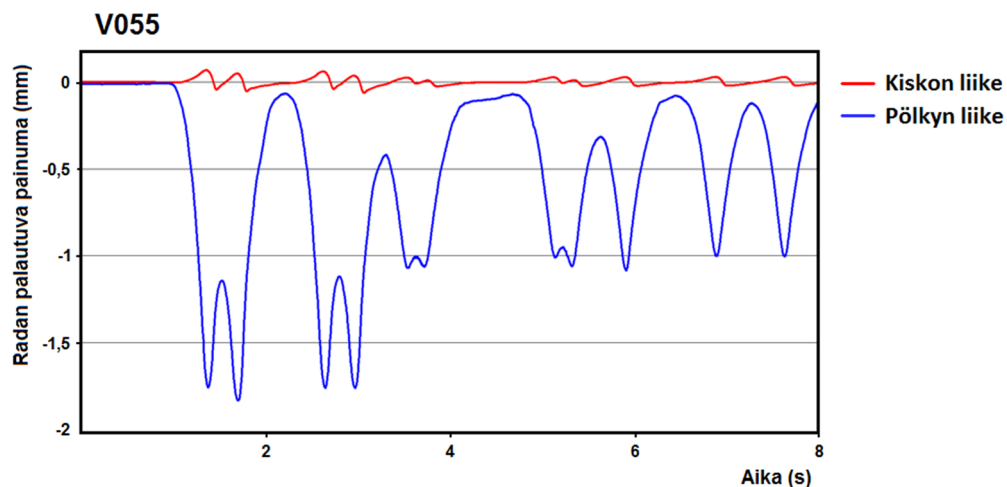
Suoran reitin ajoista (kuva 25) määritetyn liukuvan varianssin maksimiarvo on noin  $0,2 \text{ mm}^2$ . Luomala (2017) on tutkimuksissaan määrittänyt laajan mittaus-datan avulla ehdotuksen varianssin raja-arvoille eri kunnossapitotasoilla, jotka on nähtävillä taulukossa 1.

Taulukko 1. Varianssin  $\delta^2 \text{ (mm}^2\text{)}$  ehdotetut raja-arvot laskettuna 5 metrin matkalle. (Luomala 2017)

	Kunnossapitotaso							
Vikaluokka	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
C	0,25	0,25	0,3	0,5	1	2	6	8
D	0,4	0,4	0,5	1	2	4	8	12
*	0,7	0,8	1	2	4	6	15	20

Taulukkoa 1 tarkastelemalla huomataan, että koevaihteet pystytään varianssin arvolla  $0,2$  luokittelemaan parhaaseen 1AA-luokkaan. Toisin sanoen varianssin arvo on hyvin pieni, jolloin sen ei katsota aiheuttavan ongelmia edes suurilla nopeuksilla. Ylivieska-Oulu rataosalla kunnossapitotaso on 1A ja Kontiomäki-Oulu rataosalla 1 (Liikennevirasto 2018), joten varianssin osalta vaihdealue edustaa jopa parempaa kunnossapitotasoa.

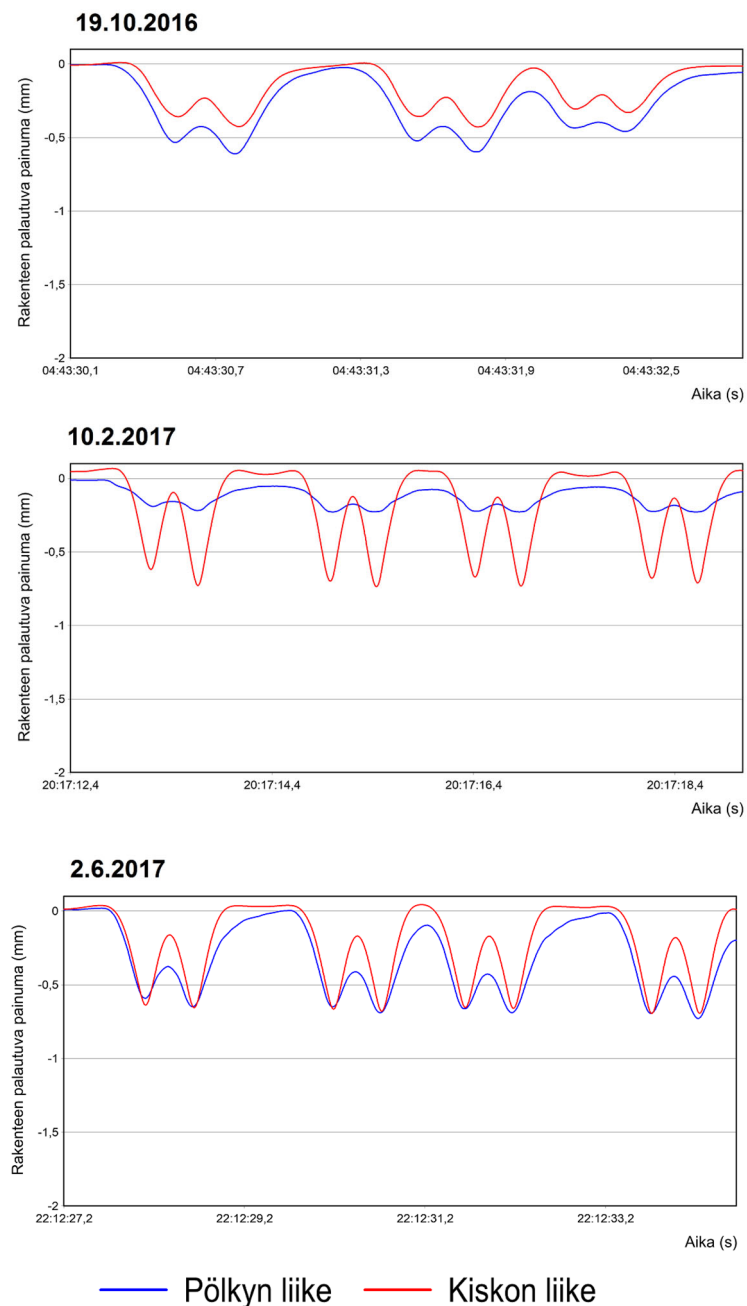
Palautuvaa painumaa mitattiin vaunuajojen lisäksi siis myös kuvissa 10–12 esitetyillä siirtymäantureilla. Niiden avulla pystytään tarkastelemaan yksityiskohtaisemmin, mitkä osat rakenteessa aiheuttavat kuvan 25 mukaisen kokonais-painuman. Kiskon ja vaihdealuslevyjen kiinnitysrakennetta on siis muutettu elastisuuden osalta melko radikaalistikin suhteessa nykyiseen rakenteeseen, joten selkeitä käyttäytymiseroja on havaittavissa jo aivan asennuksesta lähtien. Nykyisessä rakenteessa kiskon ja pölkyn välissä ei ole periaatteessa minkäänlaisia elastista komponenttia, joten palautuva painuma muodostuu kaikki pölkyn liikkeenä suhteessa pohjamaahan. Tästä on esimerkkinä kuvan 28 palautuva painuma, joka on mitattu Kouvolan ratapihalla sijaitsevan 1:9-vaihteen numero V055 välikiskoalueelta tavarajunan veturin ylittäessä vaihdetta.



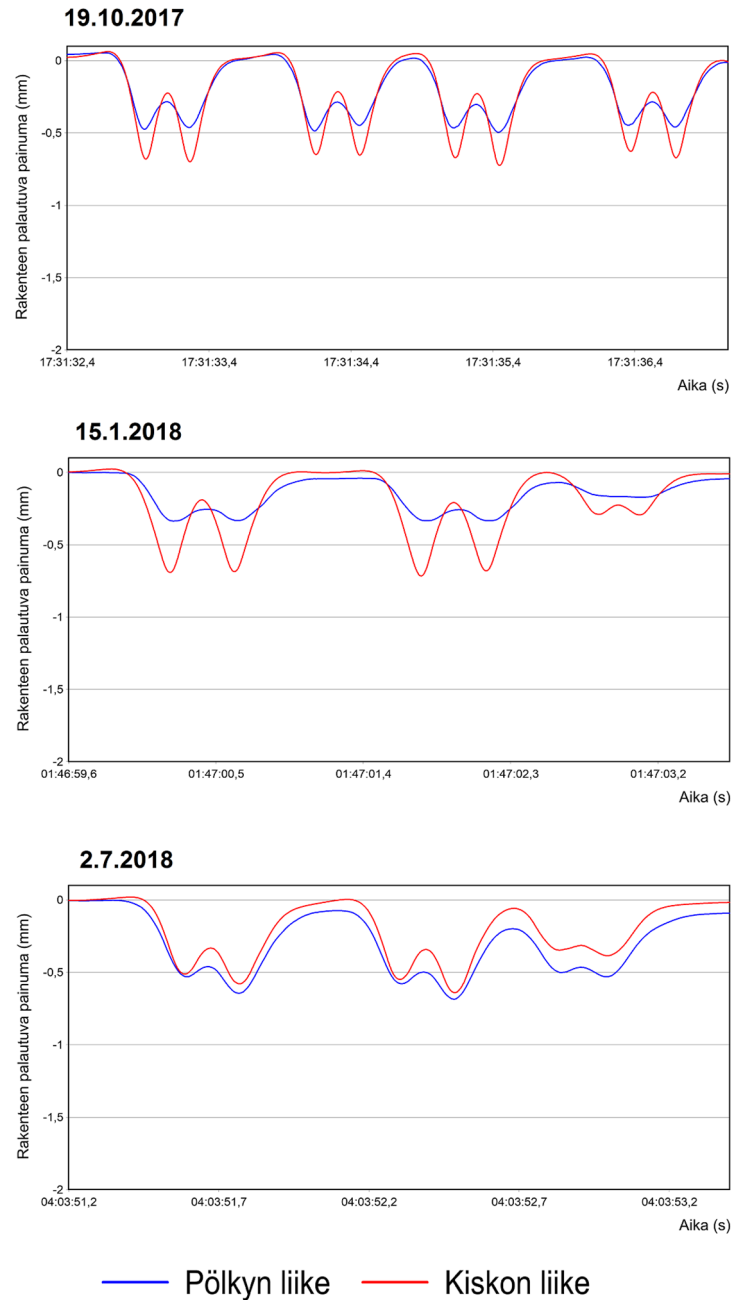
Kuva 28. Kouvolan ratapihalla sijaitsevan vaihteen V055 eri komponenttien palautuvat painumat pölkyn 30 kohdalla (Varis & Luomala 2017).



Lähtökohta palautuvalle painumalle on se, että raskaiden akselikuormien alla radan jonkin rakennekerroksen täytyy joustaa, jotta rakenteen jännitykset eivät kasvaisi liian suuriksi ja iskukuormituksilta välttyttäisiin. Palautuvan painuman muodostuminen kuvan 28 mukaisesti pelkästään tukikerroksessa ja pohjamaassa ei tietenkään ole toivottu tilanne, sillä nämä rakenteet eivät ole lähtökohtaisesti suunniteltu elastisiksi komponenteiksi. Päällysrakenteessa tulisi siis aina olla jonkinlaisia elastisia välilevyjä, jotka ikään kuin hoitavat ainakin osan tästä palautuvan painuman tarpeesta. Oulun vaihteen V331 vastaavaa palautuvaa painumaa veturin kuormituksen alaisena anturin 3 kohdalla (pölkky 117) on havainnollistettu eri mittausajankohtina kuvissa 29 ja 30.



Kuva 29. Vaihteen V331 palautuva painuma anturien 3 kohdalla ajanjaksolla 19.10.2016–2.6.2017.



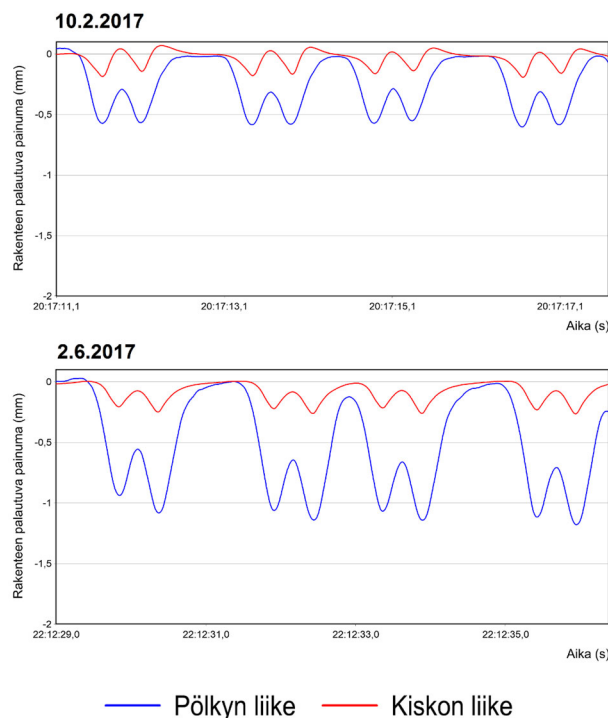
Kuva 30. Vaihteen V331 palautuva painuma anturien 3 kohdalla ajanjaksolla 19.10.2017–2.7.2018.

Kuvista 29 ja 30 nähdään, että rakenteen palautuva painuma on lähtökohtaisesti hyvin erilaista verrattuna kuvan 28 ei-elastiseen vaihteeseen. Heti vaihteen asennuksen jälkeen syksyllä 2016, palautuva painuma on veturin akselipainon alaisena pölkyssä noin 0,5 mm ja kiskossa 0,4 mm. Pölkky ei siis enää vastaa yksin kaikesta palautuvasta painumasta vaan painuma jakautuu hyvin tasaisesti välilevyn ja pölkyn välille. Näin ollen kokonaispainuma rakenteessa on 0,9 mm, joka on siis huomattavasti vähemmän kuin vastaavan akselipainon kuormittaessa Kouvolan vaihdetta V055. Tämä kertoo lähinnä siis siitä, että uusien komponenttien avulla tuentatilanne on Oulun vaihteessa säilynyt huomattavasti parempana ja pölkyn palautuvat painumat eivät ole kasvaneet. Tämä sama huomio voidaan tehdä myös tarkastelemalla muita vaihteesta V331 mitattuja painumia seurantajakson aikana. Helmikuussa 2017 ratarakenne on selkeästi

jäässä ja pölkyn painumat jäävät sen takia hyvin pieniksi pohjaimellisesta rakenteesta huolimatta. Uuden elastisen levyn ansiosta rakenteen kokonaispainuma ei kuitenkaan juuri muutu, sillä välilevy painuu tässä tilanteessa enemmän ja ikään kuin kompensoi pölkyn vähäistä joustoa. Tämä kompensointi pitää kiskoon kohdistuvat jännitykset samoina, joka on hyvin tärkeää kiskon elinkaaren kannalta. Jos kiskon alapuolinen rakenne on liian jäykkä, kiskoon muodostuu liian suuria jännityksiä, jotka nopeuttavat huomattavasti kiskorakenteessa olevien mikrosäröjen ja pintavikojen kasvunopeutta. Välilevyn avulla rakenteeseen saadaan siis miltei täysin lämpötilariippumattomat jousto-ominaisuudet, joka on hyvin tärkeä asia Suomessa, jossa radan tukikerros on jäässä huomattavan osan vuodesta.

Kuvassa 29 esitetty kesäkuun 2017 palautuva painuma kertoo juuri lämpötilariippuvuuden toisen ääripään tilanteesta. Hyvin lämpimissä olosuhteissa sekä tukikerros että välilevy kokoonpuristuvat hieman enemmän, mutta kokonaispainuma on tällöinkin vain noin 1,2 mm. Eroa talven tilanteeseen on siis vain 0,3 mm, joka on hyvin vähän. Kesäkuun 2017 tilannetta voidaan verrata myös kuvassa 30 esitettyyn lokakuun 2017 tilanteeseen. Näiden kahden ajanhetken välissä rata on tuettu, jolloin pölkyn pystysuuntaiset liikkeet ovat selkeästi vähentyneet. Tämä näkyy jälleen välilevyn käyttäytymisessä, joka kompensoi pölkyn vähäistä painumaa kokonaispainuman ollessa yhä noin 1,2 mm. Tämä sama ilmiö voidaan havaita kuvasta 30 lisäksi sekä talvella että kesällä 2018. Kokonaispainumat on siis säilyneet todella muuttumattomana koko seuranta-jakson aikana.

Näihin koevaihteisiin toimilaitteiden kohdalla asennetut teräksiset kaukalopölkkyt käyttäytyvät kuitenkin hieman eri tavalla kuin edellä esitetyt betoni-pölkkyt. Esimerkki vastaavasta kaukalopölkyn palautuvasta painumasta vaihteessa V331 anturin 2 kohdalla (pölkky 103) on esitetty kuvassa 31.

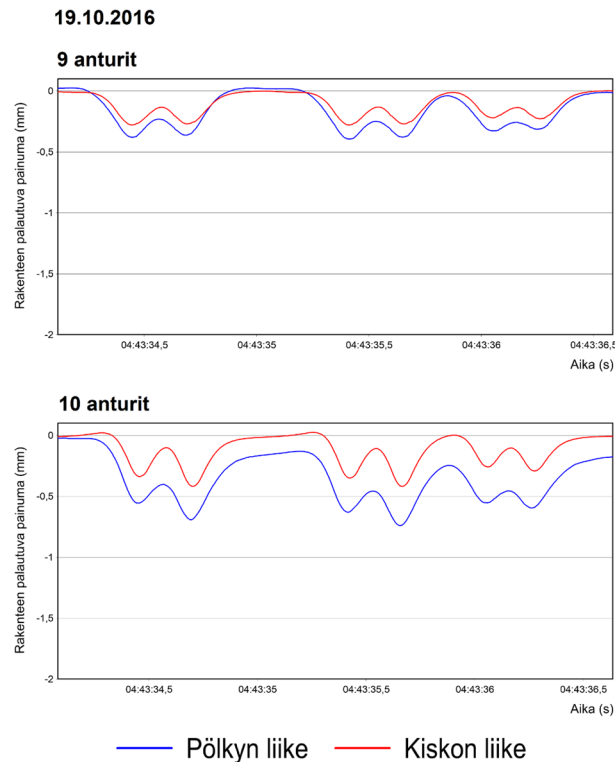


Kuva 31. Vaihteen V331 palautuva painuma anturien 2 kohdalla helmikuussa sekä kesäkuussa 2017.

Kuvia 29 ja 31 vertailemalla havaitaan, että kaukalopölkyn painumat ovat saman kuormituksen alaisena hieman suurempia kuin normaalin vaihdepölkyn sekä talvella että kesällä. Tämä ei ole odotettavaa, sillä kaukalopölkyn pohja on selkeästi normaalia vaihdepölkkyä leveämpi (350 mm vs. 310 mm), jolloin pölkyn ja sepelin välinen potentiaalinen kontaktipinta-ala on huomattavasti suurempi. Lisäksi kaukalopölkkyssä on kyljessä vielä muotoillut levitykset, jotka tarjoavat lisää pystysuuntaista tukea pölkylle (Varis & Luomala 2017). Näiden seikkojen tulisi siis pienentää palautuvia painumia. Todellisuus on kuitenkin se, että leveänä rakenteena kaukalopölkkyä ei todennäköisesti ole saatu asennusvaiheessa tuettua niin tehokkaasti kuin normaaleita pölkkyjä. Tähän vaikuttaa lisäksi vielä se, että kyseisten vaihteiden kohdalla kaukalopölkkyt olivat asennettu hieman liian ahtaalla pölkkyjaolla (pölkkyjen reunojen väli alle 150 mm), jolloin tukemishakuille ei jäänyt tukemiskoneen henkilökunnan mukaan riittävästi tilaa tehdä kunnollisia puristavia liikkeitä pölkyn alle. Tässä kohdassa tietenkin myös tukemishenkilökunnan kokemuksella on suuri rooli. Näistä syistä pölkyn ja sepelin välinen kontaktipinta-ala on jäänyt lopulta pienemmäksi ja painumat ovat suuremmat kuin normaalissa pölkkyssä. Tähän seikkaan voidaan siis luultavasti vaikuttaa tulevaisuudessa paremmalla pölkkytyssuunnittelulla ja huolellisemmalla tuentatyöllä. Tästä kertoo sekin, että Kouvolan elastisten koevaihteiden tapauksessa painumat kaukalopölkkyssä olivat keskimäärin pienempiä kuin normaalissa vaihdepölkkyssä. (Varis & Luomala 2017)

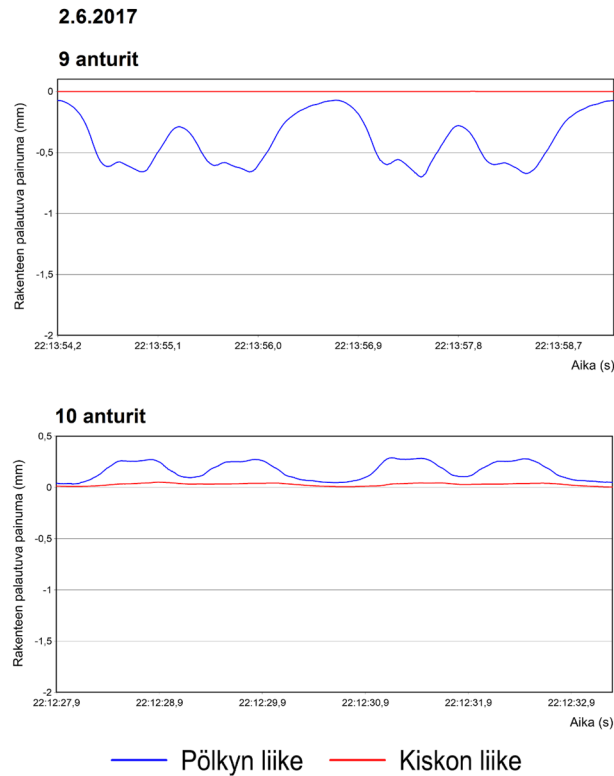
Kuvasta 31 voidaan lisäksi nähdä, että kaukalopölkyn yhteydessä käytettävät välilevyt eivät myöskään käyttäydy samaan tapaan normaalin pölkyn kanssa. Kesän 2017 tuloksissa voidaan pitää ymmärrettävänä, että välilevy ei juurikaan kokoonpuristu kuorman alla, koska pölkyn liike on isompaa. Normaaliin pölkkyyn verrattuna pölkky siis ikään kuin pakenee välilevyn alta, jolloin sen puristuma jää pienemmäksi. Talven tulokset kuitenkin näyttävät, että välilevy käyttäytyy kutakuinkin samaan tapaan myös kylmissä olosuhteissa, jolloin sekä pölkkyssä että välilevyssä palautuva painuma jää pieneksi ja kokonaispainuma on vain noin 0,7 mm luokkaa. Välilevy ei siis jostain syystä kompensoikaan pölkyn toimintaa. Materiaalinsa (EPDM) ja pinta-alansa puolesta kaukalopölkyn välilevy pitäisi olla täysin vastaava kuin normaalissakin pölkkyssä, mutta silti se käyttäytyy jäykemmin.

Kolmas erityinen kohta pölkkyjen toiminnan kannalta on risteysalue. Tälle alueelle kohdistuu risteuksen epäjatkuvuuskohdan takia hyvin paljon dynaamisia kuormituksia, joiden takia tämän alueen pölkkyt normaalisti painuvat tai vaurioituvat nopeammin kuin muut pölkkyt. Elastisessa rakenteessa tätäkin asiaa on pyritty parantamaan uusien välilevyjen ja pohjainten avulla. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty risteysalueen pölkyn palautuvia painumia suoraan risteuksen alla antureiden 9 kohdalla (pölkky 225) sekä suoran reitin puoleisessa pölkyn päässä olevista antureista 10. Kuva 32 osoittaa palautuvan painuman arvot ajettaessa vaihteen V331 suoralle reitille ja kuva 33 havainnollistaa tilannetta vaihteen poikkeavaa puolta käytettäessä.



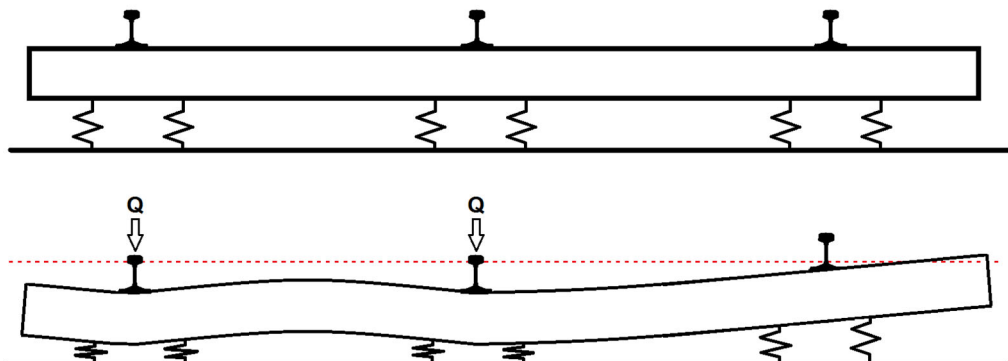
Kuva 32. Vaihteen V331 palautuva painuma anturien 9 ja 10 kohdalla junan ajaessa suoralle reitille 19.10.2016.

Kuvaa 32 tarkastelemalla voi huomata, että palautuvat painumat ovat suoraa reittiä käytettäessä isommat vastakiskon puoleisessa päässä kuin risteyksen kohdalla. Risteyskärjen alapuolinen rakenne pystyy siis hyvin kantamaan risteyksen ylityksestä mahdollisesti syntyvät dynaamiset voimalisät. Nämä antureiden arvot eivät myöskään merkittävästi eroa kuvan 29 tilanteesta, joten risteyspölkyn voidaan tämän perusteella sanoa toimivan hyvin. Tässä tilanteessa ei kuitenkaan tiedetä, miten pitkän risteyspölkyn poikkeavan reitin puoleinen pää käyttäytyy kuormittamattomana. Tästä syystä pitää tarkastella myös poikkeavan reitin ylityksiä, jolloin 10 anturit mittaavat vuorostaan kuormittamatonta puolta pölkystä.



Kuva 33. Vaihteen V331 palautuva painuma anturin 9 ja 10 kohdalla junan ajaessa poikkeavalle reitille 2.6.2017. Yläpuolisessa kuvaajassa näkyvä kiskon liikettä mittaava anturi on vikaantunut, eikä näytä todellista kiskon liikettä.

Kuten kuva 33 osoittaa, pölkky reagoi junan ylitykseen myös kuormittamattomalla puolella. Painumat risteyksen alla ovat kyseisessä junan ylityksessä pölkkyssä noin 0,6 mm tasolla, jonka vaikutuksesta pölkyn vapaa pää itseasiassa nousee jopa hieman ylöspäin. Tämä on oikeastaan hyvin ymmärrettävää, sillä risteyspölkkyllä on kuvasta 32 havaitulla tavalla hyvä kontakti sepeliin suoran reitin tukikiskon alla. Tämän kohdan toimiessa tukipisteenä pölkyn vapaa pää nousee hieman ilmaan. Tätä ilmiötä on havainnollistettu suurennetussa mittakaavassa kuvassa 34. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kuvan 33 esittämällä ajanhetkellä risteyskärjen ja pölkyn välistä liikettä mittaava anturi on jostain syystä ollut vikaantunut, jolloin todellista kiskon liikettä ei tässä tiedetä.



Kuva 34. Periaatekuva risteyspölkyn taipumasta junan kuormittaessa sitä toispuolisesti.

Pitkälle pölkylle ominainen toispuolinen kuormitus synnyttää siis pölkkyyn aina jonkin verran taivutusmomentteja, kun vapaa pää ei painu muun pölkyn mukana. Suoraan kiskon alla syntyviä palautuvia painumia tarkastelemalla ei voida siis puhua millään tavalla kriittisestä painumasta, mutta silti risteyspölkky ja kaikki muutkin risteysalueen pitkät pölkkyt joutuvat koville taivutuskoumuksien johdosta, jonka on havaittu luovan vaihdepölkkyihin pysyviä taipumia. Tämän ilmiön estämiseksi vaihdepölkkyille on määritetty kuvan 23 mukaiset linjapölkkyä korkeammat momentinsietokyvyt, mutta sekään ei ole kaikissa tapauksessa ollut riittävää. Näitä pölkkyihin syntyviä pysyviä taipumia käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 4.2. Lisäksi luvussa 4.5 esitellään älypölkkyistä saatavan datan avulla sitä, kuinka suuriksi nämä taivutusmomentit voivat risteysalueella kasvaa.

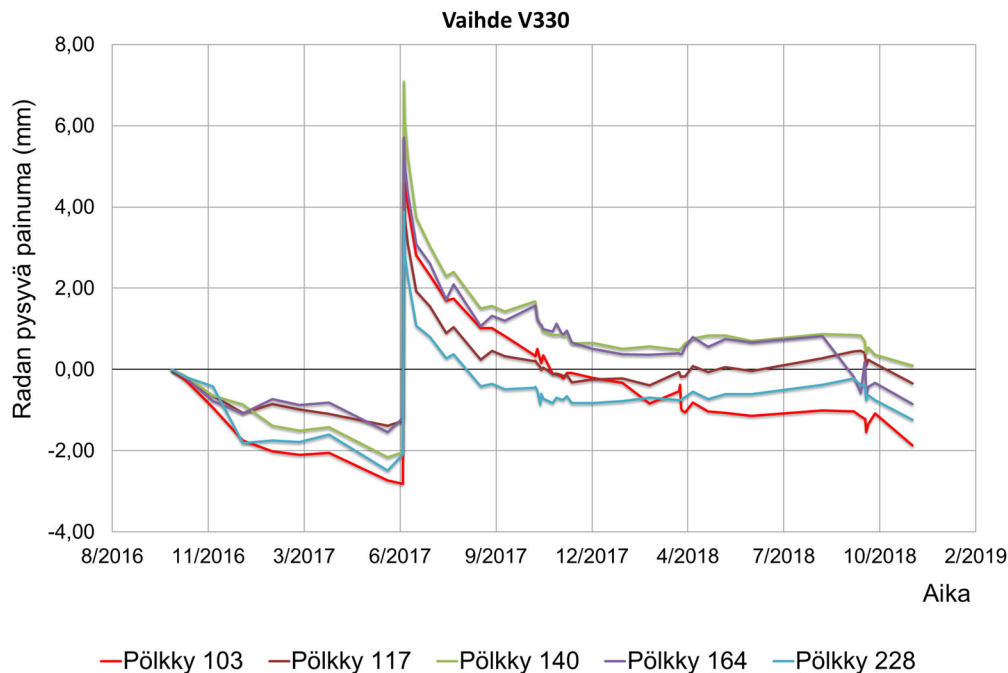
Tällaista kuvan 34 mukaista epätasaista kuormitusta tapahtuu tietenkin myös toimilaitteiden kohdalla olevissa pitkissä kaukalopölkkyissä, mutta niitä ei tueta koneellisesti pölkyn kuormittamattomalta osalta, jolloin kuvan 34 mukaista kolmatta taivuttavaa tukipistettä ei pääse muodostumaan. Ajan myötä kaukalopölkky voi tietenkin painua myös kuormittamattomalta osalta ja muodostaa osittaisen tukipisteen, mutta tätä tukipistettä ei tulisi vaihteenkääntölaitteen alle ainakaan tarkoituksella luoda.

Tästä syystä käsikäyttöisten tukemislaitteiden käyttöä tulisi välttää kaukalopölkyn kuormittamattomalla osalla. Seuraavan luvun 4.2 pysyvän painuman tulokset osoittavat, että ainakaan näissä koevaihteissa kaukalopölkky ei ole alkanut kantaa merkittävästi kuormittamattomalta osalta, joka on positiivinen asia pölkyn kestoajan ja siten myös raiteen geometrian kannalta.

Yhteenvedon voidaan todeta, että palautuvat painumat eivät ole missään pölkkyssä kovinkaan suuria, vaan pysyttelevät koko tarkastelujaksolla alle 2 mm. Tällaisten painumien ei pitäisi aiheuttaa rakenteelle vielä suurempia ongelmia, kunhan pystytään varmistamaan, että tämä ei tapahdu pölkkyssä pistemäisesti vaan pölkky painuu tasaisesti koko matkaltaan. Tällöin välttyään suurilta taivutuskoumuksilta pölkkyssä.

## 4.2 Radan pysyvä painuma

Palauvan painuman ohella vaihderakenteesta on seurattu myös radan pysyvää painumaa. Tätä asiaa voidaan tarkastella pistemäisesti samoilla siirtymäantureilla kuin palautuvaakin painumaa, jolloin saadaan tarkka tieto pysyvän painuman tilanteesta valituissa pisteissä. Näiden tulosten ohella pysyvien muutosten mittauksia on tehty kertaalleen myös jatkuvaan mittaamiseen perustuvalla geometriakärryllä, jonka tulos antaa lisävarmuutta siitä, että pistemäisesti mitatut tulokset edustavat hyvin vaihteen yleistä painumatilannetta. Kuvat 35 ja 36 havainnollistavat kummankin koevaihteen pysyvää painumaa valittujen pölkkyjen kohdalla koko seurantajakson aikana. Mittausanturit sijaitsevat siis kyseisten pölkkyjen kummassakin päässä ja lopullinen kuvaaja edustaa näiden kahden anturin mitaaman painuman keskiarvoa.



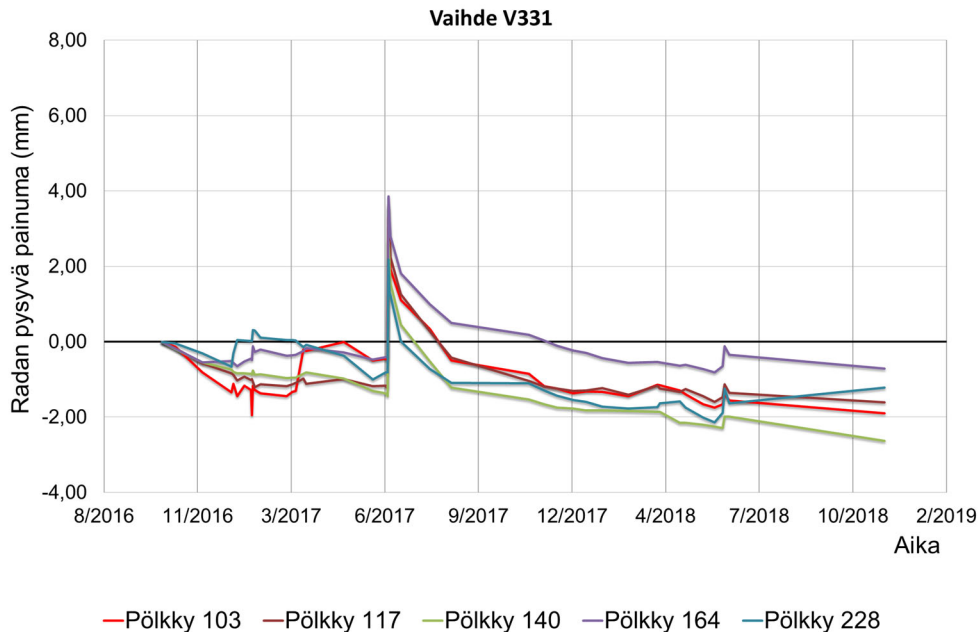
Kuva 35. Pistemäisillä antureilla mitattu radan pysyvä painuma vaihteessa V330.

Isoin huomio kuvan 35 pysyvän painumasta on se, että rata on tuettu kokonaisuudessaan 17.6.2017. Tällöin pölkkyjen pysyvä asema on noussut pölkystä riippuen noin 5–8 mm. Varsinainen tukemisen aikainen nosto on varmasti ollut isompikin, mutta kuvaajassa näkyvät tulokset on mitattu vasta seuraavana päivänä tukemisen jälkeen, jolloin vaihdetta on jo käytetty. Välittömät alkupainumat eivät siis näy kuvaajissa, jolloin kuva on tehokkaammin skaalattavissa.

Analysoitaessa vaihteen V330 tilannetta ennen tukemishetkeä, huomataan pölkkyjen pysyvän painuman kehittyneen ensimmäisen vajaan vuoden aikana hyvin tasaisesti noin 1–3 mm. Yksikään anturoitu pölkky ei siis todellisuudessa ole painunut tällä ajanjaksolla juuri lainkaan, mutta silti vaihtealue on päätetty tukea elinkaaren kannalta aikaisessa vaiheessa. Myöskään Nokelan alueen EMMA-datat eivät anna viittauksia siitä, että prototyyppivaihteiden kohdalla olisi ollut ehdotonta tukemistarvetta kesällä 2017. EMMA-vaunun mittauskäyrissä näkyy jo joulukuusta tukemishetkeen asti D-virherajan ylittävää kallistus- ja kierousvirhettä vaihteiden yhteisellä takajatkosalueella. Tämä johtuu pääosin siitä, että pitkät vaihdepölkkyt painuvat aina väistämättä kuormitetulta puoleltaan hieman enemmän kuin toiselta puolelta kuvan 34 mukaisesti ja tämä voi luoda pölkkyyn kallistusvirhettä. Näissä kummassakin vaihteessa kuormitetumpi puoli on vaihteen poikkeava reitti, jolloin pölkkyt ovat hieman "vinossa" poikkeavan reitin suuntaan. Kierousvirhe on vuorostaan suoraa seurausta siitä, että tällä alueella pölkkyt vaihtuvat noin 5 metrin matkalla vaihteen V331 pitkistä vaihdepölkkyistä lyhyisiin pölkkyihin ja jälleen uudelleen vaihteen V330 pitkiin pölkkyihin. Pitkän pölkyn kallistus poistuu siis käytännössä yhden pölkyn matkalla ja palaa 5 metrin päästä vastakkaisen merkkisenä seuraavan vaihteen pitkien pölkkyjen johdosta, jotka ovat painuneena oman poikkeavan reitin puolelleen.



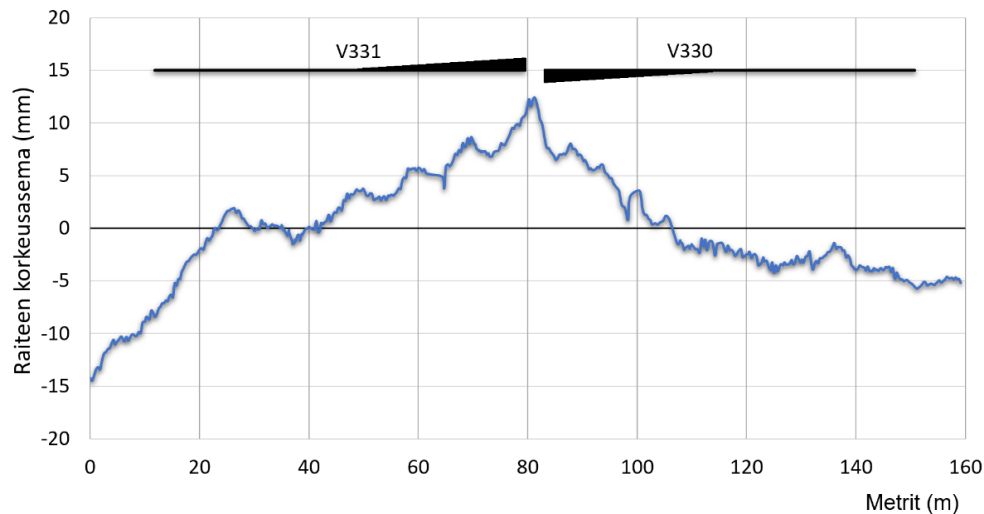
Nämä pölkkyjen pituusmuutoksista johtuvat virheet ovat kuitenkin näissä koevaihteissa hyvin paikallisia ja näkyvät EMMA-datassa vain 0–3 metrin matkalla. Pelkästään nämä virheet eivät siis anna vielä suurta syytä koko alueen tukemiselle, koska ne olisi kenties pystytty korjaamaan paikallisesti muilla keinoilla.



Kuva 36. Pistemäisillä antureilla mitattu radan pysyvä painuma vaihteessa V331.

Alueen tukeminen on todennäköisesti suoritettu siksi, että vaihteen asennusurakkaan on sisällytetty vaihteen jälkituenta vuoden sisällä asentamisesta. Kyseessä ei ole siis tarveperustainen vaan sopimusperustainen tuenta. Tällaista toimintatapaa tulisi ehdottomasti välttää varsinkin tämän tyyppisessä erikoisrakenteessa, joka on varustettu pitkän aikavälin toimintaan tähtäävillä pohjaimilla. Lyhyet tuentavälit käytännössä poistavat pohjaimien positiiviset vaikutukset, kun hiljalleen käytössä muodostunut kontakti pölkyn pohjan ja sepelirakeiden välillä hukataan tuennassa. Tuennan vaikutuksista pohjaimen käyttäytymiseen on kerrottu lisää Kehäradan pohjainvaihteista kertovassa tutkimusraportissa (Varis 2018).

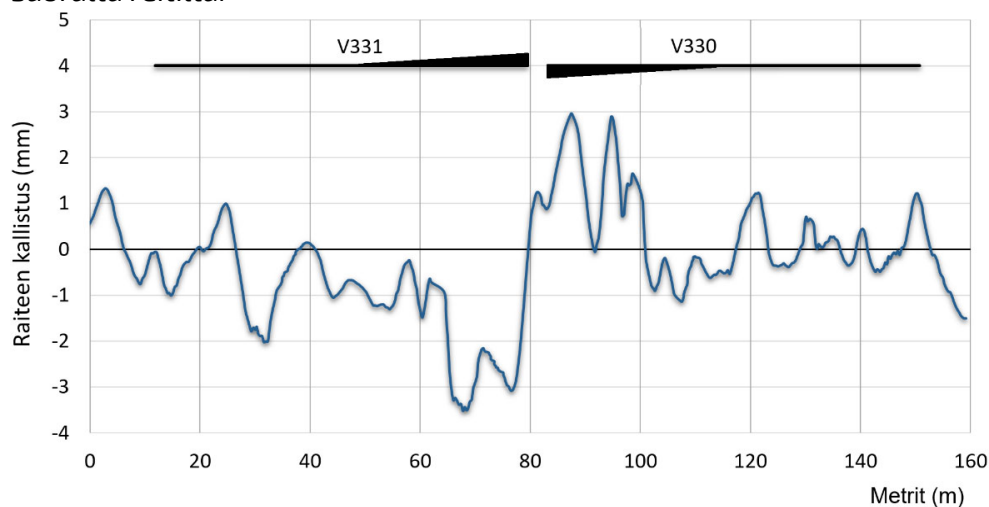
Tukemishetken jälkeen pölkkyt ovat kummassakin vaihteessa painuneet kuvien 35 ja 36 mukaisesti hyvin tasaisesti, eikä yksittäisiä heikosti toimivia pölkkyjä ole havaittavissa. Keväällä 2017 vaihteen V331 pölkkyssä 103 on havaittavissa pientä routanousua, mutta tämä on siis vain noin 1 mm luokkaa, joten sen vaikutus on aika mitätöntä. Viimeisen puolen vuoden aikana painumat ovat kehittyneet enää alle 1 mm, joten rakenne alkaa olla hyvin stabiloitunut. Näiden mittausten tueksi voidaan tarkastella myös elokuussa 2018 mitattuja geometriavaunun tuloksia, jolla pystytään mittaamaan siis yksittäisten kiskojen asemaa niin pysty- kuin vaakasuunnassakin. Kuva 37 esittää vaihteiden yhteiseltä suoralta reiteiltä mitattua korkeusasemaa. Vaunumittauksen tuloksista pystyttiin havaitsemaan, että koko mittausalueella on -1,25 promillen pituuskaltevuus etelästä pohjoiseen kuljettaessa. Tulosten luettavuuden helpottamiseksi tämä kaltevuus on poistettu kuvasta, jolloin todellista geometriaa verrataan teoreettiseen suoraan viivaan, jonka korkeusasema on nolla.



Kuva 37. Geometriavaunulla mitattu raiteen keskilinan korkeusasema kallistus vaihteiden yhteiseltä suoralta reitiltä.

Kuten kuvasta 37 voidaan havaita, vaihde V331 on asennettu vertailugeometriaan nähden hieman nousevasti ja vaihde V330 vuorostaan laskevasti. Tämä luo melko terävän geometrian muutoskohdan vaihteiden välialueelle, jossa itseasiassa EMMA-ajojenkin mukaan on havaittu D-virherajan ylittävää korkeuspoikkeamaa sekä vasemmassa että oikeassa kiskossa syksystä 2018 alkaen. Vaihteet ovat siis yksittäisinä elementteinä kohtalaisen suorassa, mutta vaihteita ei ole keskenään saatu asemoitua riittävän hyvin. Vaihdos elementistä toiseen aiheuttaa siis hyvin paikallisen ja lyhyen ongelmakohteen, jonka korjaaminen tukemallakin voi olla lopulta aika hankalaa, sillä sen korjaaminen vaatisi periaatteessa kummankin vaihteen asentovirheen korjaamisen.

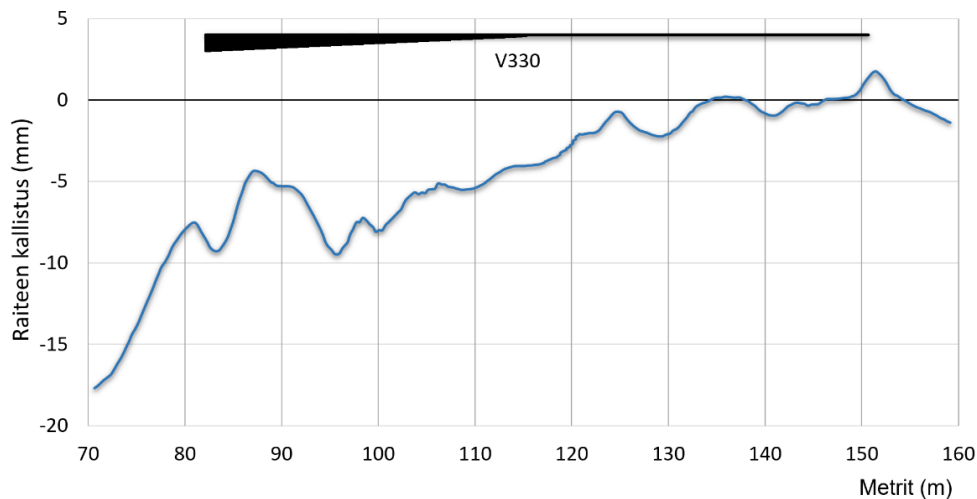
Puhtaan pystygeometrian lisäksi vaunumittauksella pystytään arvioimaan tehokkaasti myös raiteen kallistuksen arvoja, joissa oli havaittu siis myös EMMA-mittausten perusteella pieniä ongelmia ennen tukemishetkeä 2016. Kuvassa 38 on esitetty vaunulla mitattu raiteen kallistus vaihteiden yhteiseltä suoralta reitiltä.



Kuva 38. Geometriakärryllä mitattu raiteen kallistus vaihteiden yhteiseltä suoralta reitiltä. Kallistuksen positiivinen arvo tarkoittaa sitä, että kasvaviin kilometreihin päin kuljettaessa oikea kisko on korkeammalla.

Suoran reitin kallistuksen arvoista pystytään havaitsemaan, että vaihteiden välialueella on korkeuspoikkeamien ohella selkeästi poikkeavaa myös kallistuksessa. Pölkkyjen pidentyessä raide alkaa selvästi kallistumaan poikkeavan raiteen suuntaan. Vaihteiden yhteisellä takajatkosalueella pölkkygeometria muuttuu nopeasti sivulla 42 kerrotun mukaisesti pitkästä pölkystä lyhyeksi ja taas uudelleen pitkäksi, joka ilmenee nopeana kallistuksen merkin muutoksena kohti toisen vaihteen poikkeavaa raidetta. Kallistuksen arvot kumpaankin suuntaan ovat kuitenkin vielä tässä vaiheessa alle 5 mm, joka on kunnossapitotason 1A D-luokan virheraja. Ilmiö on kuitenkin tämän mittauksen perusteella jo selkeästi nähtävillä ja todennäköisesti kallistus tulee kasvamaan ajan kuluessa.

Tämän pölkyn kallistumisilmiön tutkimiseksi on hyvä tarkastella myös sitä, miltä raiteen geometria näyttää vaihteen poikkeavalla reitillä. Kuva 39 esittää vaihteen V330 poikkeavalta reitiltä mitattua raiteen kallistusta.

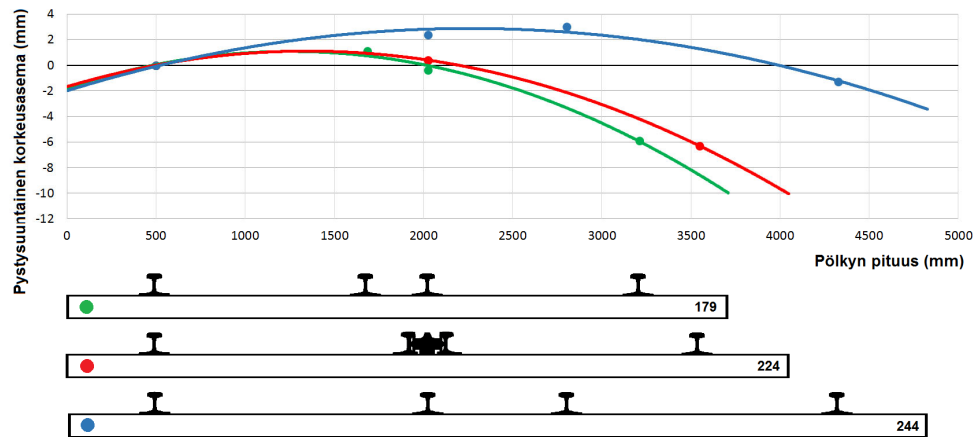


Kuva 39. Geometriakärryllä mitattu raiteen kallistus vaihteen V330 poikkeavalta reitiltä. Kallistuksen positiivinen arvo tarkoittaa sitä, että kasvaviin kilometreihin päin kuljettaessa oikea kisko on korkeammalla.

Poikkeavan reitin kallistustulokset puoltavat vahvasti edellä esitettyjä johtopäätöksiä. Pölkkyjen pidentyessä raide kallistuu hyvin vahvasti poikkeavan reitin suuntaan. Vaihteen kannassa kallistus on kasvanut jo 10 mm ja se kasvaa edelleen poikkeavaa reittiä kuljettaessa. Vaihteen takajatkosalueen jälkeen (metrit 70–80) kallistuksen kasvulle on kuitenkin selkeät syyt, sillä vaihteesta alkaa heti siirtymäkaari kohti 600 metrin kaarresäteellä olevaa kaarretta. Radassa on siis tässä kohdassa tiukka geometrian muutoskohta, jonka kuuluukin aiheuttaa rataa kallistusta. Tämä kallistus ei kuitenkaan saisi missään nimessä näkyä vielä vaihdealueen geometriassa, vaan kallistuksen pitäisi olla koko vaihdealueella aina lähtökohtaisesti nolla.

Yksittäisenä kuvan 39 mukaisena mittaustuloksena voidaan siis puhua merkittävästä poikkeavan raiteen kallistuksesta. Mutta kun sitä verrataan kuvan 38 suoran puolen kallistukseen, huomataan kyseessä olevan muutakin kuin pelkkää pölkyn kallistusta. Suoran ja poikkeavan puolen kiskoja ollessa kiinni samalla vaihdepölkkyssä, näiden kahden reitin kallistuksen arvojen tulisi teoriassa olla lineaarisessa suhteessa toisiinsa. Näin ei kuitenkaan ole, sillä jos

tarkastellaan eri reittien kallistuksen arvoja esimerkiksi mittaustulosten metrimillä 110, huomataan suoran puolen kallistuksen olevan käytännössä nolla poikkeavan puolen kallistuksen ollessa samassa kohdassa yli -5 mm. Pölkkyjen täytyy siis kallistumisen ohella olla myös hieman taipuneita. Näitä mahdollisia taipumamuotoja kolmen eri vaihdepölkyn kohdalla on havainnollistettu kuvassa 40.



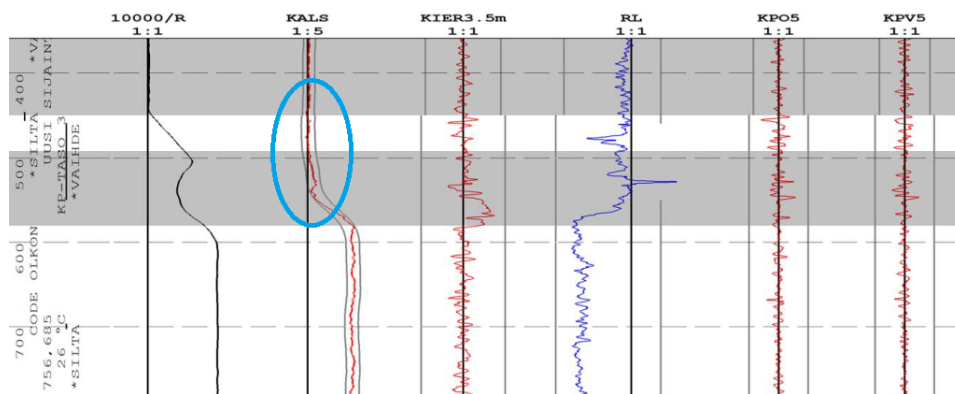
Kuva 40. Vaihdeväylän V330 pölkkyjen muoto geometriakärryn mittauksista saatujen kiskon asemien perusteella.

Kuvassa 40 nähtävien mittaustulosten perusteella pitkät vaihdepölkkyt ovat taipuneita hieman kuperaan muotoon. Tämä kuperaus voi johtua monestakin tekijästä, mutta todennäköisesti suurin vaikutus on sillä, että vaihdepölkyn teräspunostus on suunniteltu hieman epäsymmetriseksi. Teräspunostusta on siis painotettu pölkyn alaosaan, jotta se kestäisi paremmin pölkkyyn kohdistuvia taivutuskuormituksia. Punosten esijännitys voi kuitenkin tässä tilanteessa vetää pölkyn kuperaan, joka vaikuttaa negatiivisesti vaihdegeometriaan. Kuten kuvasta 40 voidaan nähdä, kuperaisuuden vaikutukset eivät juurikaan näy vaihteen suoralla reitillä. Tämä johtuu siitä, että vaihteen tukemisen yhteydessä pölkkyt asemoidaan niin, että suoran raiteen kiskot ovat aina mahdollisimman samalla tasolla. Tämä johtaa kuitenkin siihen, että poikkeavan reitin kallistusongelmat korostuvat, kuten pölkyn 179 geometriasta voidaan havaita. Poikkeavan reitin kaarteiden ulkokisko on kuperaisuuden ja varsinkin pölkyn asemoinnin johdosta suoran reitin kiskoja yläpuolella, jolloin tämän reitin kiskoja pystysuoraan mitattu kallistuksen arvo kasvaa todella suureksi. Sama asemoinnista johtuva kallistusilmiö on nähtävillä myös risteyskärjen alla olevassa pölkkyssä 224. Takajatkosalueen pölkky 244 on asemoitu kuperaisuuden suhteen tasaisemmin, jolloin kallistusvirheet ovat hieman maltillisemmat. Tämä voidaan havaita suoraan myös kuvasta 39, sillä pölkky 244 sijaitsee mittausmetrillä 86, jossa kallistuksen arvot ovat hetkellisesti pienemmät.

Alueelta mitattujen EMMA-ajojen perusteella radasta voidaan havaita hyvinkin saman suuruisia kallistuksen arvoja kuin edellä olevat kuvaajat esittävät. Suoralta radalta poiketen ne ovat kuitenkin aiheuttaneet koko seurantajaksolla vain kaksi metrin matkalla olevaa D-virheluokan ylitystä, joista toinen oli lokakuussa 2016 ja toinen toukokuussa 2018. Tämä virheiden vähäisyys johtuu kahdesta eri seikasta. Ensinnäkin vaihteen poikkeavaa reittiä mitattaessa virherajoina käytetään tässä vaihteessa kunnossapitotason 3 virherajoja, joiden mukaan kallistus saa kasvaa rakenteessa 8 millimetriin ennen D-virherajan ylitystä. Tämä on 3 millimetriä enemmän kuin saman vaihteen suoralla raiteella,

eli vaihteen reitit luokitellaan eri arvoiksi. Tämä on varmasti myöskin syy, miksi pölkyt on asemoitu siten, että ne ikään kuin priorisoivat suoran raiteen geometriaa. Kunnossapitotasoa on alennettu, koska vaihteen poikkeavalla reitillä suurin sallittu nopeus on kaarresäteen takia joka tapauksessa vain 80 km/h, joka vastaa ratateknisten ohjeiden (Ratahallintokeskus 2006b) mukaisesti kunnossapitotason 3 tai 4 mukaista nopeusluokkaa. Kunnossapitotason laskeminen ei siis todellisuudessa vaikuta kyseisen osuuden käytettävyyteen.

Toinen syy virallisten EMMA:lla mitattujen geometriavirheiden vähäisyyteen on se, että vaihteen takajatkosalueelta kallistuksen virherajat liikkuvat jostain syystä kallistuksen muutoksen tahdissa, kuten kuvasta 41 voidaan havaita.



Kuva 41. Rataosalla Oulu-Kontiomäki mitattu EMMA-mittakäyrä. Sinisen ympyrällä korostettuna raiteen kallistuksen arvot vaihteen V330 poikkeavalla reitillä.

Raiteen kallistuksen raja-arvot ovat siis tällä kyseisellä kunnossapitotasolla  $\pm 8$  millimetriä tavoitellusta geometriasta. Vaihteen alueella tavoiteltu geometria pitäisi olla aina kummallakin raiteella kallistuksen suhteen nolla, jolloin sallittu vaihteluväli on absoluuttisesti  $-8$  millimetristä  $+8$  millimetriin. Kuvasta 41 nähdään, että vaihteen kärkialueella raja-arvot ovat juuri tämän mukaiset, mutta tämän jälkeen raja-arvot lähtevät muuttumaan mittausdatan mukana vaihteen kantaan päin kuljettaessa ja vaihteen takajatkosalueella kallistuksen raja-arvot ovat jo  $0-16$  mm. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että takajatkosalueelle on muodostettava hieman poikkeavan raiteen suuntaan viettävää kallistusta, jotta pysytään määritetyissä raja-arvoissa. Samaan aikaan vaihteen suoralla reitillä pyritään kuitenkin mahdollisimman kallistamattomaan tilanteeseen. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että tällä mittaustekniikalla pölkyntäytyy olla ainakin hieman kupera, jotta säilyttäisiin virheittä kummallakin raiteella. Jos kallistuksen raja-arvot pysyisivät EMMA-mittauksessa vakiona, kuten on vaihteissa tarkoitus, vaihteen poikkeavalle reitille muodostuisi nykyisellä geometrialla useita D-luokan virheitä.

Ratateknisten ohjeiden osassa 13 (Ratahallintokeskus 2006b) mainitaan, että nuolikorkeuden, korkeuspoikkeaman ja kallistuksen raja-arvot määritetään poikkeamana keskimääräiseen arvoon nähden. Nuolikorkeuden ja korkeuspoikkeaman kohdalla tämä keskiarvotus muodostuu suoraan siitä, että ne määritetään vaunun omassa 12 metrin mittakannassa, eli pitkän tasaisen absoluuttipoikkeaman kohdalla mittatulos näyttää silti aina nollaa. Tämä on täysin ymmärrettävää, sillä nuolikorkeusvirheiden ja korkeuspoikkeaman kohdalla



nimenomaan muutokset ovat kriittisiä ei itse absoluuttiarvo. Kallistus vuorostaan määritetään mittavaunun lattiaan kiinnitetyn gyroskoopin avulla (Ratahallintokeskus 2005), jolloin se on aina absoluuttinen tulos ja kertoo kiskojen todellisen korkeuseron toisistaan. Anturin antama tulos ei siis nollaudu pitkälläkään kallistusjaksolla, eikä ole syytäkään nollautua, sillä väärä kallistuksen arvo on aina haitallista. Kallistuksen raja-arvojen keskiarvotus tekee kuitenkin nyt sen, että EMMA-mittausvaunu ei havaitse mitään virheitä, jos kallistuksen muutos on riittävän hidasta. Suoralle radalle saa siis tulla periaatteessa vaikka 15 millimetrin kallistus ilman virheluokitusta, kunhan muutos tapahtuu tasaisesti. Pelkkien EMMA-mittauksen virhelistauksien tutkiminen ei siis anna kallistuksen tapauksessa todellista kuvaa radan geometrisesta kunnosta.

Yhteenvetona vaihteen pysyvistä painumista voidaan todeta, että vaihteet ovat säilyttäneet todella hyvin asemansa ja yksittäisiä ongelmakohtia ei ole muodostunut kumpaankaan vaihteeseen. Vaihteessa V330 havaittiin mittauksissa poikkeavan raiteen suuntaan olevaa kallistusta, johon olisi kenties syytä puuttua, mutta tämän virheen korjaaminen on todennäköisesti melko hankalaa, sillä pitkät vaihdepölkkyt ovat hieman kuperia, jolloin poikkeavan puolen geometrian korjaaminen suoremaksi huonontaisi suoran raiteen geometriaa.

Näistä pölkkyjen kallistus- ja käyryysongelmista puhuttaessa on kuitenkin ensisijaisen tärkeää ymmärtää, että nämä eivät johdu tai ole liitoksissa millään tapaa prototyyppivaihteiden elastisiin ominaisuuksiin, vaan ne ovat ihan yleisiä kaikissa vaihdetyypeissä tavattuja ongelmia. Nämä on kuitenkin hyvä tuoda esiin, jotta elastisuusominaisuuksien parantamisen ohella pystytään parantamaan myös vaihteen muita ominaisuuksia ja niiden kunnossapidon menetelmiä.

## 4.3 Tukikiskojen, kielirakenteen ja risteyksen kuluminen

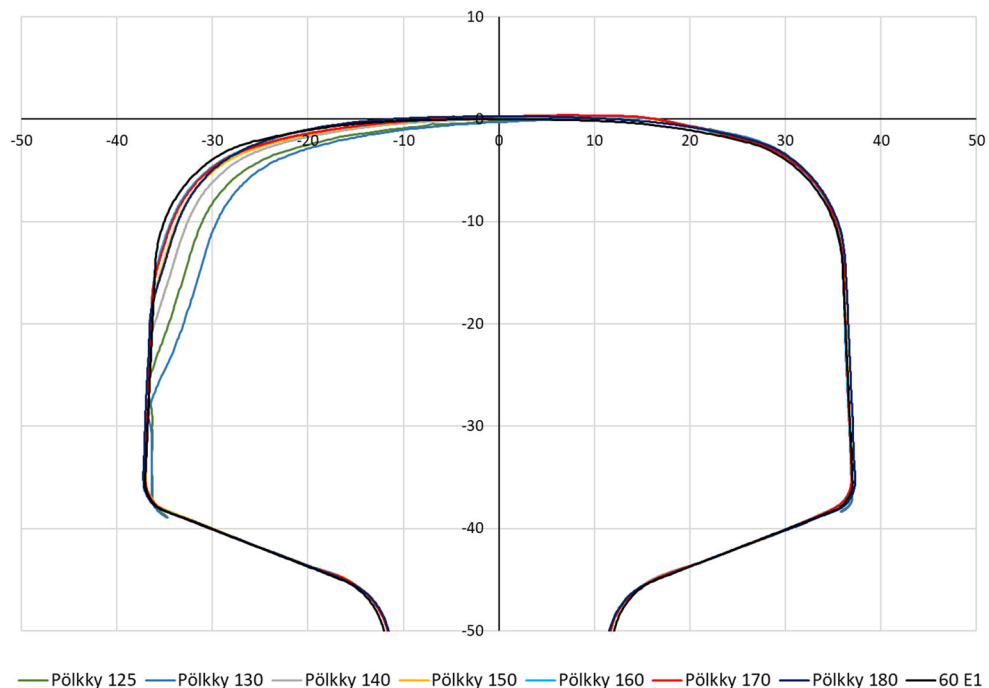
Rakenteen painuman ohella vaihteen toiminnan kannalta on myös olennaisen tärkeää tutkia, miten uusi elastisempi rakenne vaikuttaa kisko- ja kieliprofiilien kulumiseen. Tähän profiilimittaukseen käytettiin luvussa 3.3 esiteltyjä Calipri ja Miniprof-mittalaitteita, jolla saatiin mitattua kuvan 18 mukaiset mittapisteet kummastakin vaihteesta. Kuten luvussa 3.3 todettiin, kiskojen kulumista mitattiin projektin aikana yhteensä neljä kertaa. Tässä luvussa analysoidaan näiden neljän mittauksen avulla saatuja tuloksia prototyyppivaihteiden kulumisesta sekä verrataan niitä myös referenssikohteista saatuihin tuloksiin.

Jo profiilimittauksia tehtäessä kävi silmämääräisesti tarkastellen hyvin selvästi ilmi, että vaihteiden alueella tukikiskot ja kielirakenne kuluvat hyvin vahvasti. Kielien kulumisesta indikoi kuvan 42 mukainen suuri määrä metallipölyä kiskon jalan läheisyydessä sekä kielen kulkupinnan selkeä repeytyminen.



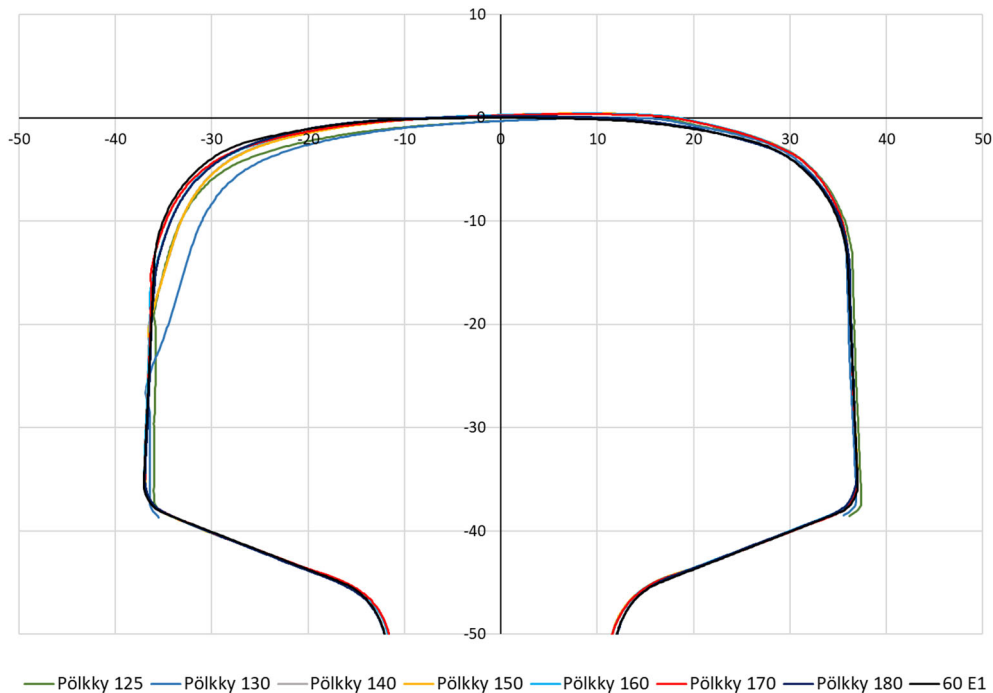
Kuva 42. Vaihteen V331 poikkeavan puolen kielisovituksen kulumistilanne elokuussa 2018.

Neljä erillistä kulumismittausta osoittivat, että mittaushetkistä pahin tilanne oli vuoden 2017 syksyllä, joiden tuloksia vaihteiden välikiskoalueella on esitetty kuvissa 43 ja 44. Kaikki kulumismittauksista saadut tulokset niin välikisko- kuin kielialueellakin ovat esitetty Liitteessä 2.



Kuva 43. Vaihteen V330 poikkeavan reitin välikiskoalueen poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 125–180 kohdalla 18.10.2017

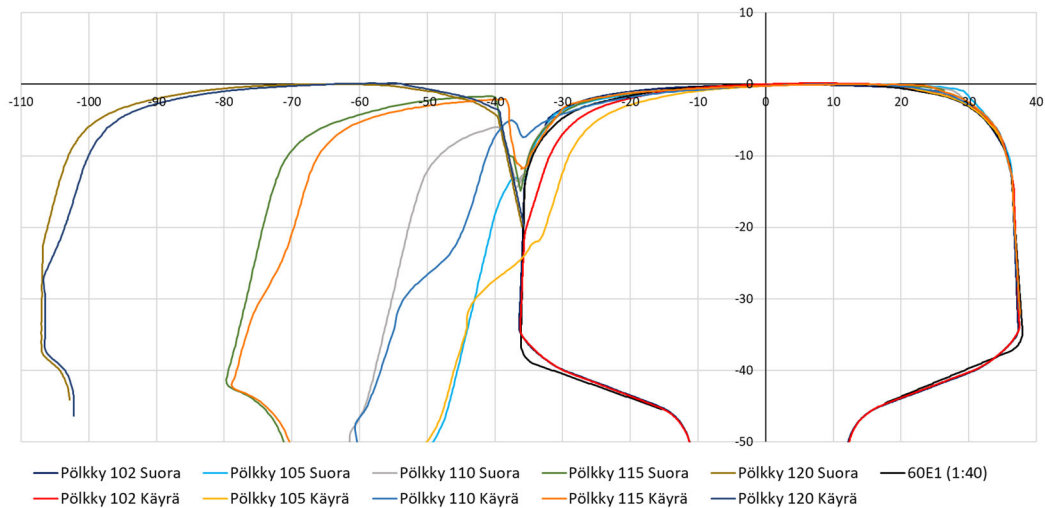
Välikiskon kulumistuloksista voidaan havaita, että kiskot ovat selkeästi sivukuluneet, mutta kiskon pystysuuntaista kulumista ei ole juuri lainkaan. Kuluminen on hyvin saman tapaista kummassakin koevaihteessa, eli käytännössä suurimmat muutokset ovat tapahtuneet vaihteen kärkialueella, jossa sivukuluminen (14 mm kulkupinnan alapuolella) on pölkyn 130 kohdalla maksimissaan noin 5 mm verrattuna referenssinä toimivaan 60E1-kiskoon.



Kuva 44. Vaihteen V331 poikkeavan reitin välikiskoalueen poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 125–180 kohdalla 18.10.2017

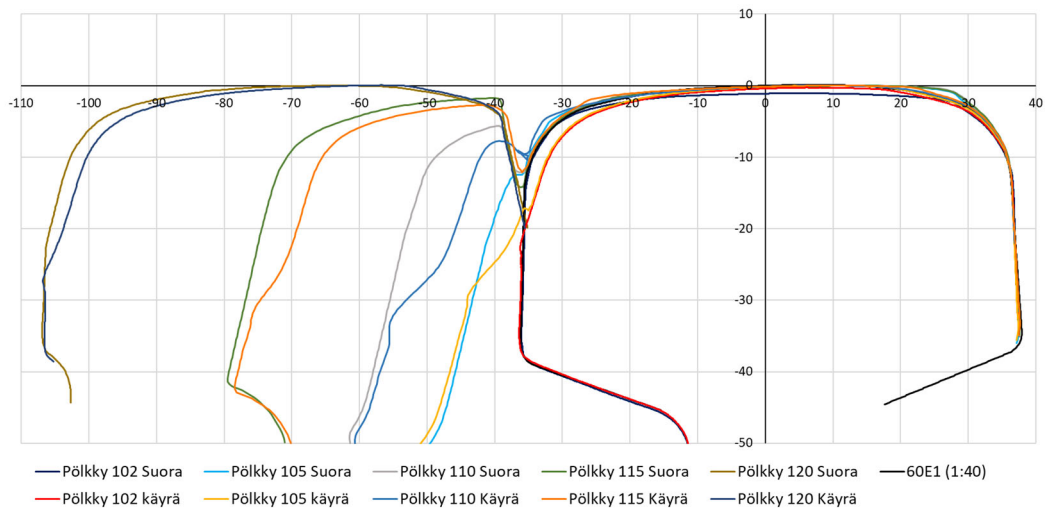
Tämä johtuu todennäköisesti suoraan siitä, että kummassakin vaihteessa raskas tavaraliikenne liikkuu vaihteen kannasta kärkeen päin, jolloin voimakkaimman kulumisen aiheuttama raskaan pyöräkerran laippakontakti voimistuu kaarretta edettäessä. Näiden kiskojen ollessa poikkeavalla raiteella, jossa sallittu maksiminopeus on 80 km/h, kulumisrajana pidetään ainoastaan sitä, että sivukuluminen ei saa ylittää kiskon hamaran alareunaa (Ratahallintokeskus 2006b), jolloin varsinaista rajaa ei siis ole. Mutta kulumisen voidaan silti sanoa olevan voimakasta, kun vaihdetta oli käytetty kuitenkin mittaushetkellä vasta vajaa 1,5 vuotta.

Koska välikiskoalueen kulumiskuvista on havaittavissa kulumisen selkeää kasvua vaihteen kärkialueelle siirryttäessä, on äärimmäisen tärkeää tarkastella tilannetta myös kielialueella. Alla on esitettyinä kuvissa 45 ja 46 vuoden 2017 mittauskerralta käyrän kielen kulumista verrattuna vastaavaan suoran kielen kulumiseen.



Kuva 45. Vaihteen V330 kielisovitusten poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 102–120 kohdalla 18.10.2017.

Kuten kielisovitusalueen kulumistuloksista voidaan nähdä, sivukuluminen jatkaa kasvuaan siirryttäessä välikiskoalueelta kohti kielen kärkeä raskaan kaluston kulkusuunnan mukaisesti. Pölkyn 120 kohdalla kuluminen on melko vähäistä, eli hetkellisesti pölkkyjen 120 ja 125 (kuva 43) kohdalla laippakontakti ei ole jostain syystä niin voimakasta. Pölkyn 115 kohdalla sivukuluminen on kuitenkin jo jälleen kasvanut kummassakin vaihteessa noin 5 millimetriin ja pölkyn 110 kohdalla kuluminen on jo noin 8 mm.

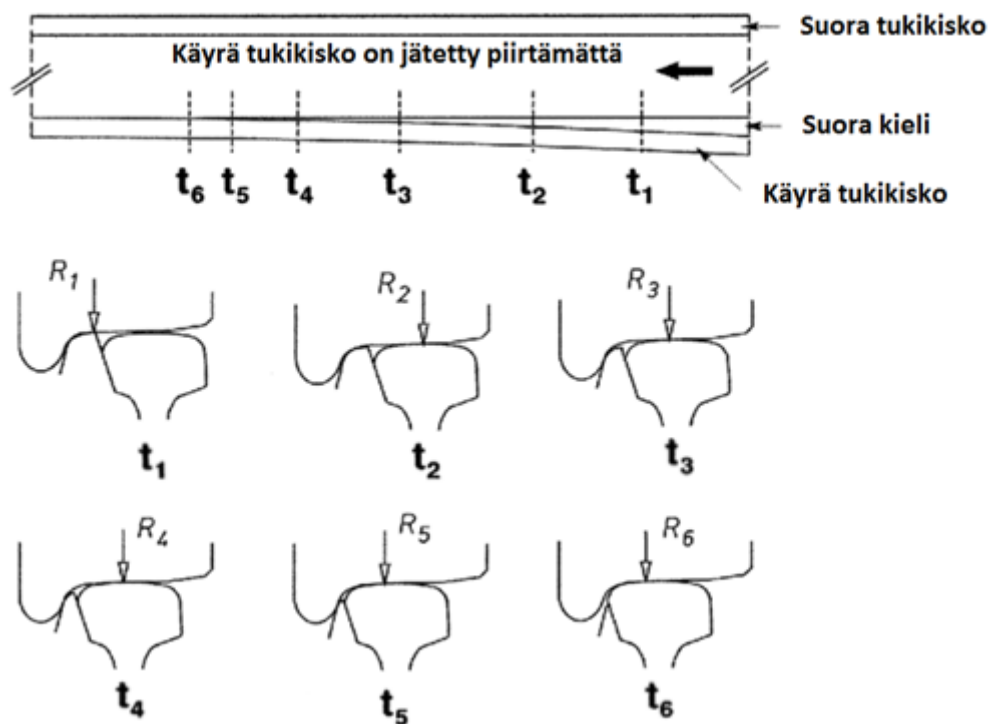


Kuva 46. Vaihteen V331 kielisovitusten poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 102 – 120 kohdalla 18.10.2017.

Laippakontakti, ja siitä johtuva kuluminen, on siis mittaustulosten mukaan kummassakin koevaihteessa kaikista suurinta pölkkyjen 105–115 alueella. Tämä johtuu suurella todennäköisyydellä siitä, että juuri tällä alueella pyörä siirtyy vaihteen kannasta tultaessa kielirakenteelta tukikiskolle. Tämä siirtyminen aiheuttaa raiteeseen aina eräänlaisen epäjatkuvuuskohdan, jonka johdosta pyörä tekee tietyn suuruisen sivuttaissiirtymän. Kuvassa 47 on havainnollistettu ajan suhteen pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan siirtymistä junan siirtyessä suoralta kieleltä käyrällä tukikiskolle. Ajanhetki  $t_1$  kuvaa tilannetta,

jossa pyörä on vielä kokonaan vaihteen kielen päällä ja ajanhetki  $t_6$  tilannetta, jossa pyörä on ohittanut kielisovitusalueen ja kontakti on täysin tukikiskon varassa. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002) Tässä kyseisessä Oulun tapauksessa juna kulkee ongelmatilanteessa pitkin käyrää kieltä ja siirtyy siitä suoralle tukikiskolle, mutta ilmiö on täysin vastaava myös sillä puolella.

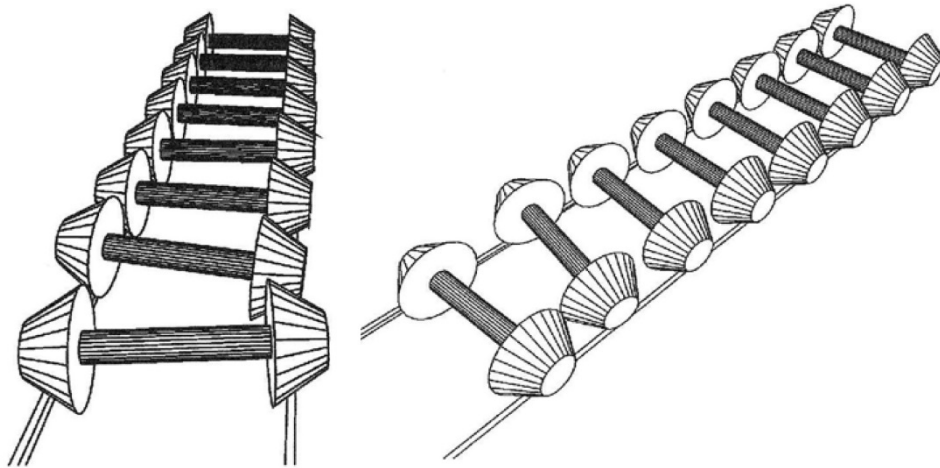
Kuvasta 47 voidaan nähdä, että ajanhetkellä  $t_2$  kontaktikohta R siirtyy yhtäkkiä tukikiskon varaan ja siirtyy pyörän kannalta katsottuna hyvin paljon kohti ulko-reunaa. Junan pyörän profiilin ollessa kartion muotoinen tämä siirtyminen johtaa siihen, että pyörän halkaisija kontaktikohdassa pienenee ja junan vasemman ja oikean pyörän kulkukehät eivät ole enää saman suuruiset, sillä toisessa pyörässä kontaktikohta ei siirry normaalilla kiskolla. Junan pyörät pyrkivät tietenkin tasoittamaan tämän kulkukehien eron, jolloin junan pyöräkerta lähtee tässä tilanteessa hyvin äkkinäisesti hakeutumaan poikittaissuunnassa entistä enemmän kohti kontaktissa olevaa suoraa tukikiskoa, eli kuvan tapauksessa oikealle. Tällöin jo valmiiksi laippakontaktissa, eli toisin sanoen kaksipistekontaktissa, oleva pyörä hakeutuu siis vain voimakkaammin laippakontaktiin, joka näkyy kuvien 45 ja 46 mukaisena voimakkaana kulumisena pölkkyjen 105–115 alueella.



Kuva 47. Pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan ( $R_{1-6}$ ) poikittaissuuntainen siirtyminen junan pyörän siirtyessä tukikiskolta vaihteen kielelle. Kuva lainattu muokattuna lähteestä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002).

Seuraavilla ajanhetkillä  $t_3 - t_6$  pyörän ja kiskon välinen kontakti R siirtyy junan edetessä koko ajan takaisin kohti pyörän normaalia kontaktikohtaa, jolloin vierintäsäde-ero suhteessa toiseen pyörään pienenee ja ohjautuminen kohti laippakontaktia rauhoittuu pienentäen sivukulumisen määrää. Kuva 48 havainnollistaa tätä kielisovitusalueella tapahtuvaa sivuttaissiirtymää koko pyöräkerrassa.

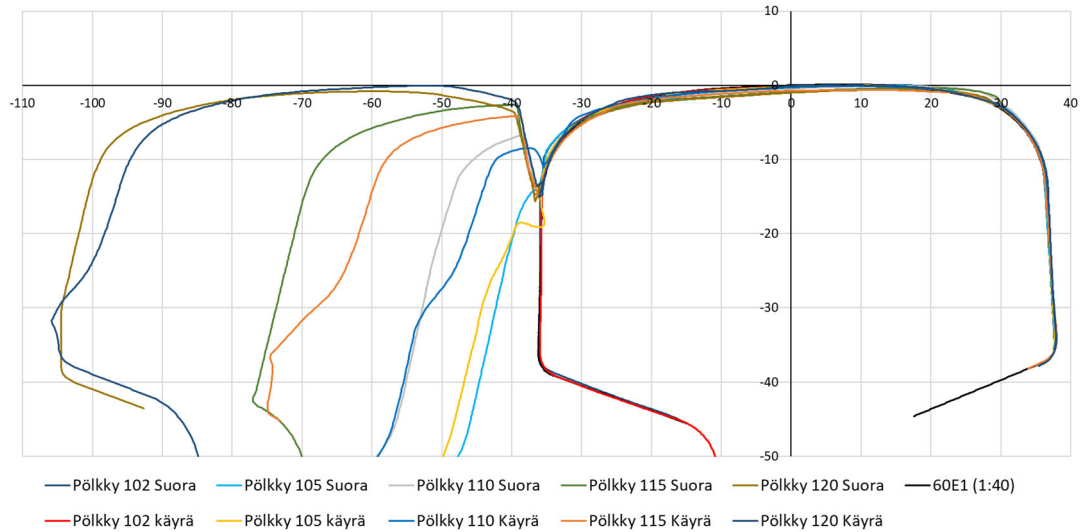




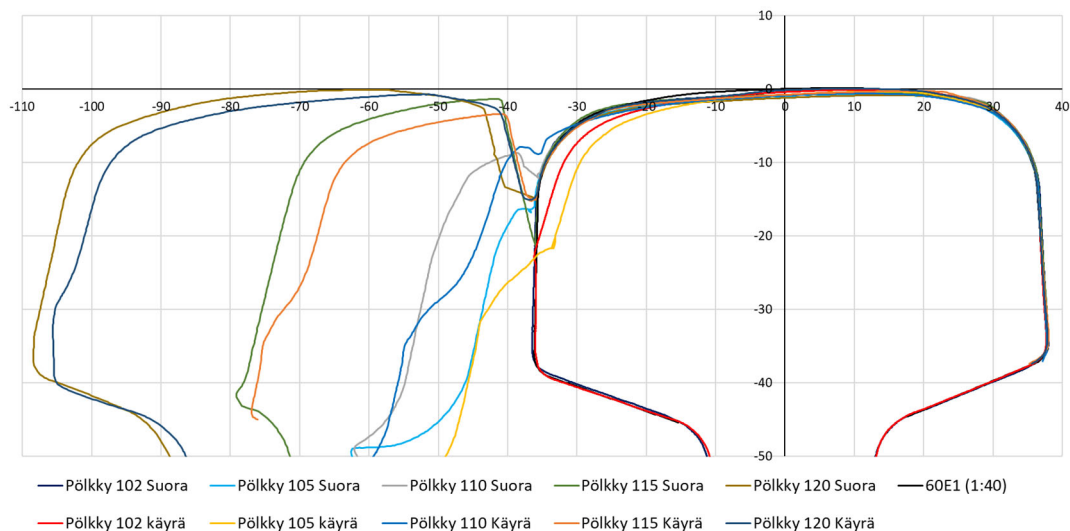
Kuva 48. Pyöräkerran sivuttaissuuntainen hakeutuminen vaihteen kärjen alueella. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002.)

On kuitenkin hyvä muistaa, että tämä koko yllä kuvattu skenaario perustuu siis ideaalikiskoilla ja ideaalipyörillä toteutuvaan kontaktiin, jossa tehollisen kartiokkuuden arvot ovat hyvällä tasolla ja ohjautumista tapahtuu. Pyörien ja kiskon kulumisen muuttaa luonnollisesti tehollisen kartiokkuuden arvoja, jolloin ohjautuvuus voi heikentyä ihan kaikilla sivusiirtymillä ja tilanne muuttuu huomattavasti ennalta-arvaamattommaksi. Lisää tästä pyörän siirtymisestä vaihteen epäjatkuvuuskohtien yli on kerrottu Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä-sarjan julkaisussa 9/2017 (Varis 2017).

Tämän kulumisilmiön paremman ymmärtämisen vuoksi projektin kuluessa päätettiin mittauksia laajentaa myös Nokelan vaihteiden ulkopuolelle. Koe-vaihteissa on paljon uusia rakenneratkaisuja, jotka voisivat periaatteessa lisätä kulumista, joten näiden tulosten rinnalle haettiin vertailudataa Kontiomäen vaihteista V961 ja V963, jotka ovat vaihdetyypiltään täysin samanlaisia 1:15,5 risteysuhteella ja 900 metrin kaarresäteellä varustettuja vaihteita ilman elastisia komponentteja. Näiden rakenteiden kiskoprofiileja tutkimalla saadaan vankkaa lisätietoa siitä, onko uudet elastisuuteen pyrkivät rakenneratkaisut kulumisongelmien taustalla. Alla on havainnollistettuna kuvissa 49 ja 50 näiden Kontiomäen vaihteiden kielisovitusalueen kulumista marraskuussa 2018.



Kuva 49. Kontiomäen vaihteen V961 kielisovitusten poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 102–120 kohdalla 27.11.2018.

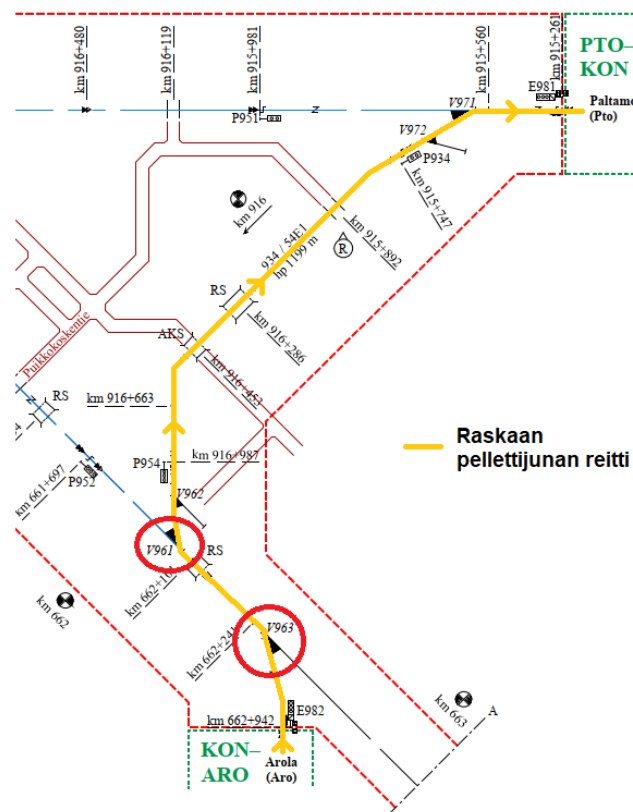


Kuva 50. Kontiomäen vaihteen V963 kielisovitusten poikkileikkausprofiilit pölkkyjen 102–120 kohdalla 27.11.2018.

Kuvista 49 ja 50 voidaan havaita, että myös normaalilla vaihderakenteella varustetut Kontiomäen kielisovitukset ovat vahvasti kuluneet suurimman sivukulumisen ollessa jopa noin 10 mm. Kuluminen pääsyyt eivät siis liity suoranaisesti elastiseen rakenteeseen. Lähempi tarkastelu kuitenkin osoittaa, että kulumismuodoissa on selkeästi eroa näiden Kontiomäen vaihteiden välillä. Vaihteen V963 kulumismuodot kuvassa 50 muistuttaa hyvin paljon Oulun elastisten vaihteiden kulumista kuvissa 45 ja 46, eli kulumisen lisääntyy kannasta kärkeen päin tultaessa ja kulumista on havaittavissa vielä pölkkyissä 102 ja 105. Vaihteessa V961 kärkialue on kuitenkin huomattavasti paremmassa kunnossa ja kulumisen on merkittävää vasta pölkystä 110 eteenpäin. Tämä johtuu täysin vaihteiden asemasta raiteistokaaviossa. Vaihde V963 on haarautumisvaihte Kontiomäeltä Vartiuksen suuntaan, jolloin kaikki Vartiuksesta tulevat raskaat GOST-standardin mukaiset pellettijunat ajaa tästä vaihteesta aina kannasta kärkeen päin, kuten Oulussakin. Vaihde V961 on vuorostaan haarautumisvaihte Kontiomäeltä Paltamon suuntaan, jolloin tämä sama raskas kalusto käyttää

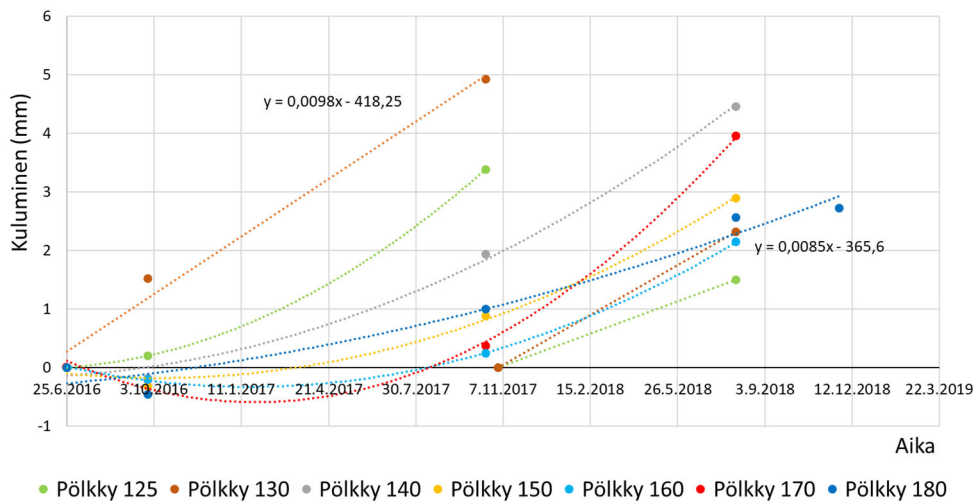
vaihdetta kärjestä kantaan päin kuvan 51 mukaisesti. Junan tullessa vaihteeseen pyörät siirtyvät hiljalleen poikkeavan raiteen kaarteeseen vaikutuksesta epäsuotuisaan laippakontaktiin. Kärjestä päin tultaessa tämä siirtyminen tapahtuu juuri pölkkyjen 101–110 matkalla, jolloin sivukuluminen on tällä alueella selvästi vähäisempää. Tämä on kulumisen kannalta hyvin kriittinen alue, sillä kuten kuvan 50 pölkkyjen 105 kohdalta voidaan nähdä, ohuen kielirakenteen sivukuluminen tarkoittaa samalla myös suurta pystykulumista ja käytännössä koko kielirakenteen katoamista.

Nimenomaan siis raskaan kaluston kulkusuunnalla on suuri merkitys siihen, miten vaihteen kielisovitusalue kuluu. Luonnollisesti nämä samat junat palaavat tyhjinä saman reitin toiseenkin suuntaan, mutta sen vaikutus on tulosten mukaan vähäisempi. Tästä voidaan vetää johtopäätös, että Ouluun asennetut koevaihteet ovat liikennesuunnasta johtuen kulumisen kannalta epäsuotuisasti asemoitu. Vaihdetta eniten kuormittava liikenne ei saisi tulla vaihteen poikkeavaa reittiä kannasta päin. Oulun Nokelassa tätä tilannetta on kuitenkin käytännössä mahdotonta välttää, koska kummatkin vaihteet ovat asemoitu niin, että niiden suoraa reittiä käyttää Ylivieska–Oulu välin nopea henkilöliikenne. Tämän liikenteen siirtäminen poikkeavalle raiteelle haittaisi merkittävästi henkilöliikenteen aikataulutusta.

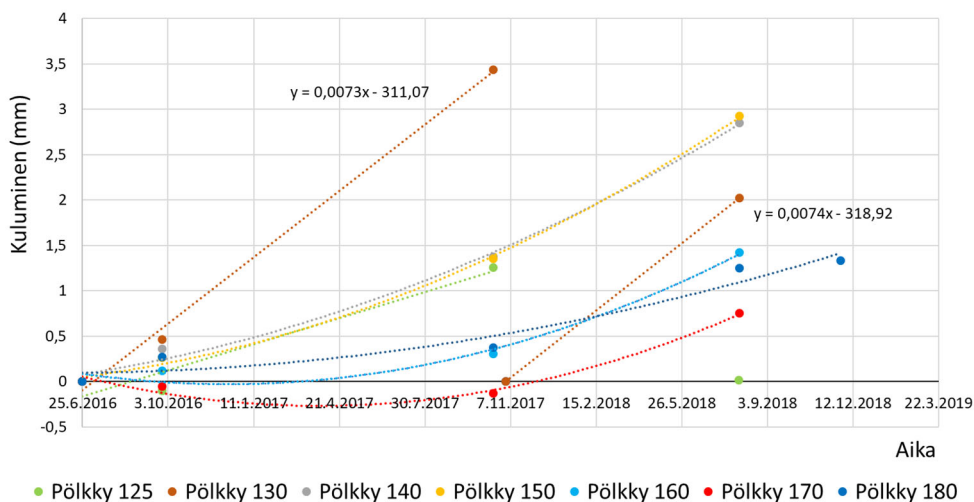


Kuva 51. GOST-standardin mukaisen raskaan pellettijunan reitti Kontiomäellä.

Kulumisen ollessa näin voimakasta, on tärkeää tutkia kulumismäärän ohella myös kulumisnopeutta seurantajakson aikana, jotta pystytään arvioimaan paremmin mahdollisia kiskonvaihdon ajankohtia myös tulevaisuudessa. Kuvissa 52 ja 53 on esitetty sekä vaihteen V330 että V331 välikiskoalueen sivukuluminen tulokset pääosin kolmelta ensimmäiseltä mittauskerralta. Mittaus on suoritettu 14 mm hamaran todellisen kulkupinnan alapuolelta.



Kuva 52. Vaihteen V330 välikiskoalueen sivukuluminen aikavälillä 26.9.2016–27.11.2018.

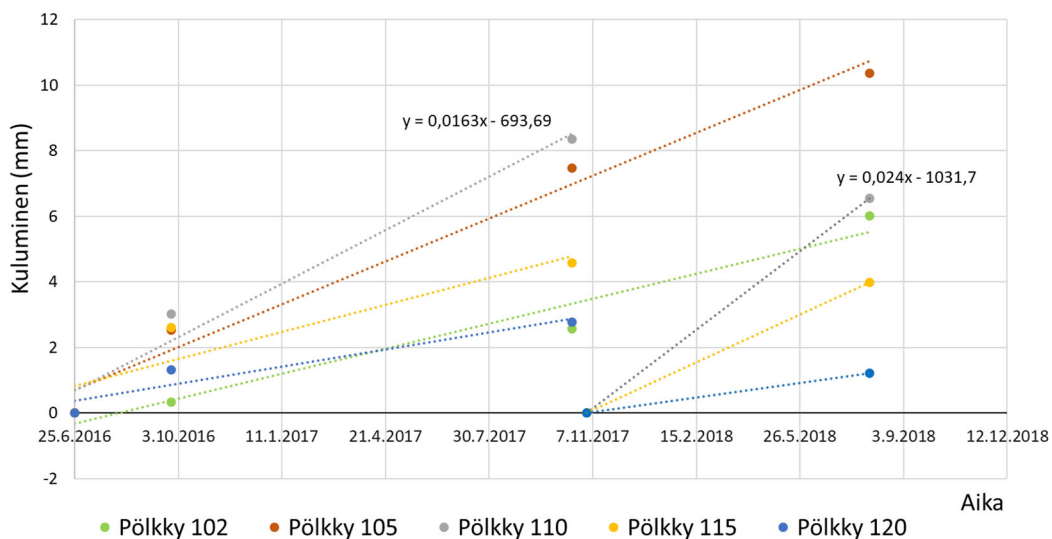


Kuva 53. Vaihteen V331 välikiskoalueen sivukuluminen aikavälillä 26.9.2016–27.11.2018.

Kuvissa 52 ja 53 esitetyt kulumistulokset osoittavat, että välikiskoalueen kulumisen on ollut kummassakin vaihteessa kohtuullisen lineaarista seurantajakson aikana. Suurin kulumisnopeus on kummassakin vaihteessa jo kuvista 43 ja 44 nähdyllä tavalla pölkyn 130 kohdalla, joka on noin 2,5–3,5 millimetriä vuodessa. Tämän vahvan kulumisen myötä kummankin vaihteen käyrän puolen kielisovitus vaihdettiin marraskuussa 2017, jolloin kulumisen niin sanotusti nollautui. Melkein sama kulumisvauhti (0,0098 ~ 0,0085 mm/vrk ja 0,0073 ~ 0,0074 mm/vrk) on kuitenkin jatkunut pölkyn 130 kohdalla myös vaihdon jälkeen, joten tässä kohdassa lineaarinen suhde kertoo hyvin kulumisen kehitymisestä. Syksyllä 2018 kummastakin vaihteesta vaihdettiin sekä käyrän puolen kielisovitus että käyrän puolen välikiskot. Tästä johtuen viimeisellä mittauskerralla marraskuussa 2018 kulumista näkyi ainoastaan pölkyn 180 kohdalla, joka ei ole enää välikiskoalueella, vaan se on osa risteuselementtiä. Se on siis ainoa mittapiste, jossa kisko säilyi alkuperäisenä koko seurantajakson aikana. Kuvien 52 ja 53 selkeyttämiseksi nämä nolla-kulumistulokset on jätetty merkitsemättä viimeisen mittaushetken kohdalle.

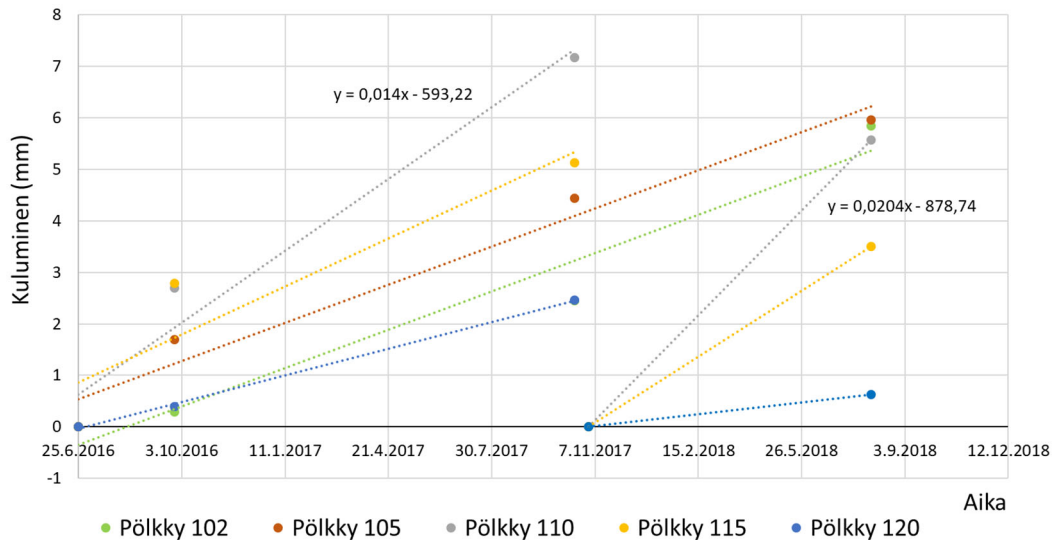
Tiettyjen pölkkyjen kohdalla kulumisen kulmakerroin näyttää hieman kasvavan ajan myötä. Tämä kasvu on kuitenkin hyvin hidasta vaihteen V330 pölkkyä 170 lukuun ottamatta. Pölkyn 170 kohdalla kulumisen on ollut käytännössä olematonta ensimmäisten kahden mittauksen ajan, mutta toisen ja kolmannen mittauksen välisenä aikana kisko on kulunut tästä kohdasta käytännössä yhtä voimakkaasti kuin pölkyn 130 kohdalla. Pyörän kulku on siis jostain syystä muuttunut tällä alueella ja laippakontakti on selkeästi voimistunut. Tätä kulumisen voimistumista ei ole kuitenkaan havaittavissa pölkkyjen 160 tai 180 kohdalla, joten syitä tälle ilmiölle on hyvin vaikea näiden tulosten perusteella löytää.

Välikiskoalueen ohella kulumisnopeutta tulee tarkastella myös kielisovitusalueella. Kuvissa 54 ja 55 on esitetty vastaavat kulumisnopeudet kummankin koevaihteen kielisovitusalueella kolmella ensimmäisellä mittaukserällä. Tulokset osoittavat, että kulumisen kehittyminen on kielisovitusalueellakin hyvin lineaarista. Suurimmat kulumisnopeudet muodostuvat jo aikaisemmistakin tuloksista nähdyllä tavalla pölkyn 110 kohdalle, jossa kulumista tapahtuu noin 5–9 millimetriin vuodessa. Tämä kulumisnopeus on johtanut siihen, että käyrän puolen kielisovitus on jouduttu vaihtamaan käytännössä jokaisena syksynä uuteen. Kummassakin vaihteessa kulumisnopeudet ovat jopa kasvaneet pölkyn 110 kohdalla vuoden 2017 vaihdon jälkeen, joten pyörän ja kiskon välinen laippakontaktiongelma ei ole ainakaan vähentynyt ajan kuluessa.



Kuva 54. Vaihteen V330 kielisovitusalueen sivukuluminen aikavälillä 26.9.2016–1.8.2018.

Kulumisnopeutta pystytään siis pääosin arvioimaan vaihteen eri kohdissa lineaarisella suhteella. Täydellistä varmuutta tämä ei kuitenkaan anna, sillä äkkinäistä kulumisen kiihtymistäkin on havaittu. Nämä nopeuskuvaajat antavat myös varmistetun käsityksen siitä, että voimakkain kulumisen on koko seuran-tajakson ajan tapahtunut juuri pölkkyjen 105–115 kohdalla, eli alueella, jossa pyörä siirtyy kielirakenteelta tukikiskon varaan.

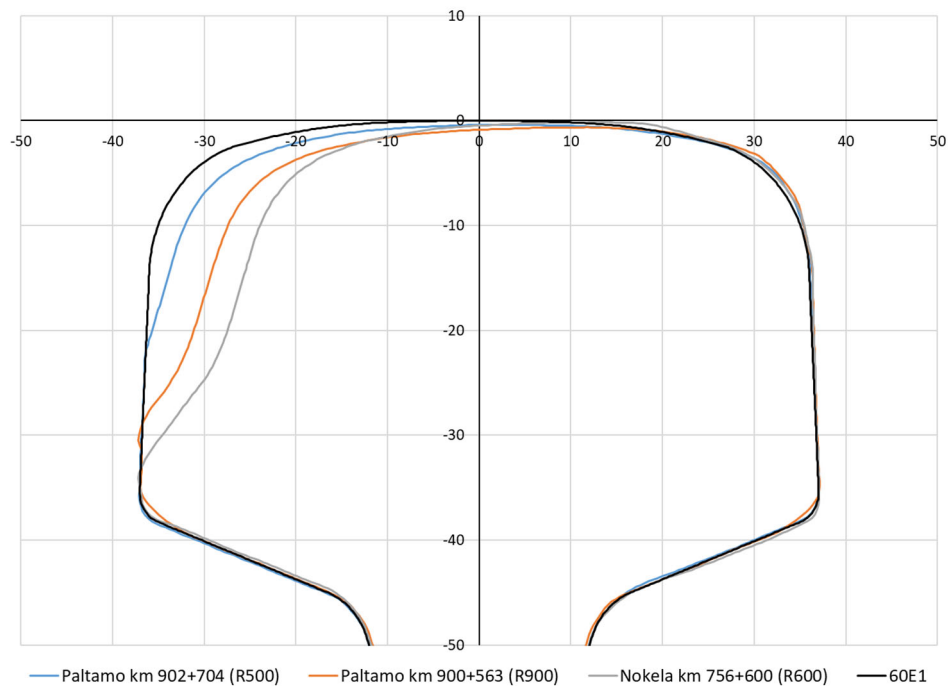


Kuva 55. Vaihteen V331 kielisovitusalueen sivukuluminen aikavälillä 26.9.2016–1.8.2018.

Tämä on junan turvallisen kulun kannalta hyvin kriittinen kohta, sillä pyörän siirtymäkohdassa kuluminen voi johtaa ohuen kielen lohkeamiseen ja sen uudelleenmuokkautumiseen, jolloin riski pyörän kiipeämiselle saattaa kasvaa hyvin nopeasti. Tästä syystä laippakontaktiin johtavat syyt tulisi selvittää perinpohjaisesti.

Kulumisongelman laajuuden selvittämiseksi kiskon profiilimittauksia suoritettiin myös vaihteiden ulkopuolisissa kolmessa kaarteessa pellettijunan reitiltä. Nämä mittauskohteet valittiin siten, että niiden kaarresäteet olisivat lähellä koevaihteiden 900 metrin kaarresädettä. Tällä kriteerillä mittauskohteiksi valikoitui Nokelan alueelta vaihteen V330 kannasta Kontiomäelle lähtevä R600 kaarre (km 756+600), Paltamon liikennepaikan länsipuolella oleva R900 kaarre (km 900+563) sekä Paltamon itäpuolella oleva R530 kaarre (km 902+704). Näistä kohteista mitatut suurimmat kiskon kulumiset on esitetty kuvassa 56. Kiskot ovat jokaisessa kohteessa hieman eri ikäiset ja Nokelan R600 kaarteeseen kiskot ovat oletettavasti kaikista vanhimmat. Kiskojen yli kulkeneiden bruttonnien ero vaikuttaa siis myös kulumismääriin.





Kuva 56. Kiskon poikkileikkausprofiilit kolmesta eri kaarteesta välillä Oulu–Kontiomäki. Kiskot ovat jokainen hieman eri ikäisiä, joten osa erosta johtuu suoraan kiskoja kuormittaneiden bruttotonniin erosta.

Kuvasta 56 voidaan nähdä, että kiskot ovat kuluneet hyvin vahvasti myös normaaleissa kaarteissa. Nokelan vaihteen V330 kannasta lähtevässä 600 metrin kaarresäteellä olevassa kaarteessa sivukuluminen on lähes 12 mm, eli vielä enemmän kuin mitattujen vaihteiden kielisovitusalueella. Myös Paltamon R900 kaarteessa sivukuluminen on lähes 7 mm, joka vastaa suurin piirtein mitattujen vaihteiden kulumismääriä pyörän siirtymäalueen ulkopuolella. Tällaiset 600-900 metrin kaarresäteet aiheuttavat siis kiskojen kulumisongelmia myös laajemmalla alueella. Hyvin merkittävä seikka on kuitenkin se, että Paltamon tiukemmassa R530 kaarteessa kulumismäärät ovat huomattavasti pienemmät. Kaarresäteen tiukentaminen 600 metristä 530 metriin ei siis lisääkään auto-maattisesti kulumista, kuten voisi keskihakuvoiman ja ohjaustarpeen lisääntymisen kautta kuvitella. Tätä ilmiötä tukee myös silmämääräiset havainnot Nokelan vaihteessa V350 (YV60-500-1:11,1-V), jossa kuluminen on huomattavasti pienempää kuin viereisissä koevaihteissa V330 ja V331. Tämän vaihteen V350 poikkeavan raiteen maksiminopeus on 60 km/h, jolla poikittaiskiihtyvyyden arvot ovat aivan samalla tasolla varsinaisten koevaihteiden kanssa. Todellisuudessa nopeus näissä kaikissa vaihteissa on suurin piirtein samanlainen, koska ne sijaitsevat käytännössä peräkkäin Oulun ratapihalla ja jarrutus/kiihdytys tällä matkalla on aika marginaalista.

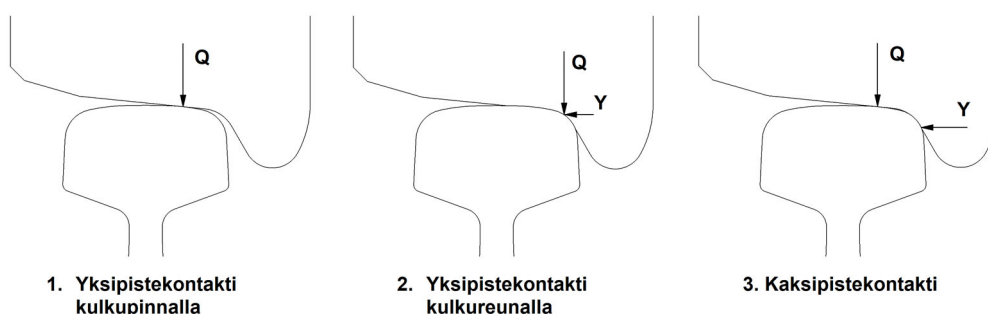
Yksi merkittävä tekijä näiden kaarteiden kulumiseroille löytyy tietenkin kaarteiden kallistuseroista ja niissä käytettävistä nopeuksista, jotka vaikuttavat mahdolliseen kallistuksen vajaukseen ja sitä kautta kulumiseen, jota on tutkittu laajemmin Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä sarjan osassa 14/2016 (Loponen et al 2016). Nokelan R600 kaarteessa käytetään 78 mm kallistusta, Paltamon R900 kaarteessa 96 mm kallistusta ja Paltamon R530 kaarteessa 85 mm kallistusta. Kallistuksen  $D$  ja kaarresäteen  $R$  avulla voidaan laskea jokaiselle näistä kaarteista tasapainonopeus  $V_0$  kaavan (2) avulla.

$$V_0 = \sqrt{\frac{DR}{12,5}} \quad (2)$$

Nokelan kuluneimmassa R600 kaarteessa tasapainonopeus on 61 km/h. Sekä henkilöjunat että tavarajunat ovat liikkuneet tässä kaarteessa junaliikenteen havaintojärjestelmä Juliasta saatujen tietojen mukaisesti useimmiten noin 20–40 km/h nopeudella, mutta yksittäisiä kertoja Nokelan alueella on havaittu kunnossapitäjän tietojen mukaan myös yli 80 km/h nopeuksia. Tällaisilla nopeuksilla kaarteissa on kallistuksen vajautta 55 mm. Tämä ei ole vielä merkittävän suuri kallistuksen vajoaus, sillä Väyläviraston ohjeissa (Liikennevirasto 2010) kallistuksen vajuuden maksimiarvoksi määritellään 130 mm, mutta saattaa silti olla yksi tämän kaarteiden kulumisen selittävästä tekijöistä.

Paltamon R900 kaarteessa tasapainonopeus on vuorostaan 83 km/h, jonka vastaa aika tarkkaan tämän kohdan todellista kulkunopeutta, jota rajoittaa heti kaarteiden länsipäässä oleva Veräjäkorven tasoristeys, jonka kohdalla sallittu maksiminopeus on 80 km/h. Kallistusarvon perusteella Paltamon itäpuolella olevan R530 kaarteiden tasapainonopeus on 60 km/h, joka on hieman suurempi kuin Kiehimänjoen ratasillan vuoksi asetettu alueen nopeusrajoitus 50 km/h. Tässäkään kaarteissa junien nopeudet eivät siis aiheuta kallistuksen vajautta. Nämä kaarrepärametrit eivät siis suoranaisesti selitä sitä, miksi Paltamon kahdessa kaarteissa esiintyy eri verran kulumista.

Syy tälle kulumisen vähäisyydelle tiukemmissa kaarteissa saattaaakin löytyä itse asiassa juuri ohjaustarpeen lisääntymisestä. Tiukassa kaarteissa pyörä ajautuu todennäköisesti alkuun entistä vahvemmin laippakontaktiin, eli junan pyörille muodostuu kiskoihin nähden suuri sivuttaissiirtymä ja näin ollen suuri vierintäsäde-ero, kun ulkokiskon puoleinen pyörä kiipeää laipalle. Tämä kasvattaa ohjaustarvetta niin paljon, että teli joutuu selkeästi kääntymään uuteen asentoon, jonka jälkeen pyöräkerta lopulta pääsee pois laippakontaktista. Näissä 600–900 metrin kaarresäteiden kaarteissa ongelmaksi voi siis muodostua juuri se, että pyörä ei sivukulumisesta huolimatta ajaudu ollenkaan puhtaaseen laippakontaktiin kiskon kulkureunalla vaan on jatkuvasti niin sanotussa kaksipistekontaktissa, jota on havainnollistettu kuvassa 57.



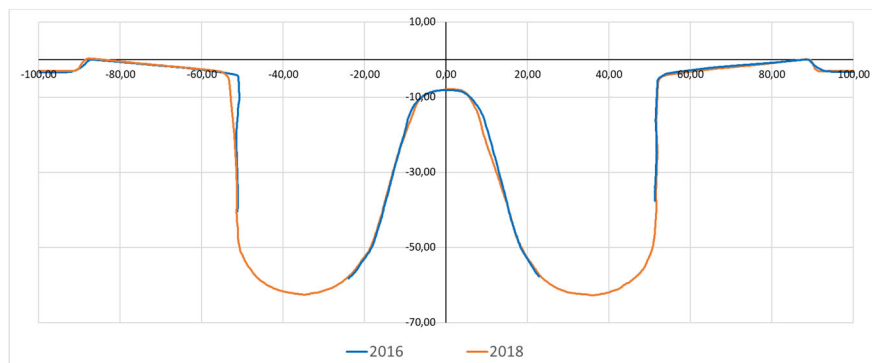
Kuva 57. Pyörän ja kiskon välinen kontakti ja siitä kiskoon muodostuva jännitysjaakuma kolmella eri pyörän asemalla.

Kuvan 57 kohta 1 kuvaa normaalia pyörän ja kiskon välistä kontaktia suoralla raiteella, jossa pyöräkerta on tasapainossa. Seuraava kohta 2 kuvaa tilannetta, jossa pyörä on ajautunut poikittaisvoimien johdosta kontaktiin kiskon kulkureunalle ja pyörän vierintäsäde on selkeästi kasvanut. Tällöin ollaan siis niin

sanotussa laippakontaktissa, josta pyörä pyrkii vierintäsäde-eron takia aktiivisesti takaisin kohti tasapainotilannetta 1. Oletettavaa on, että junan pyörät käyttäytyvät R500 kaarteissa juuri tällä tavalla ja suuria sivukulumisia ei pääse syntymään.

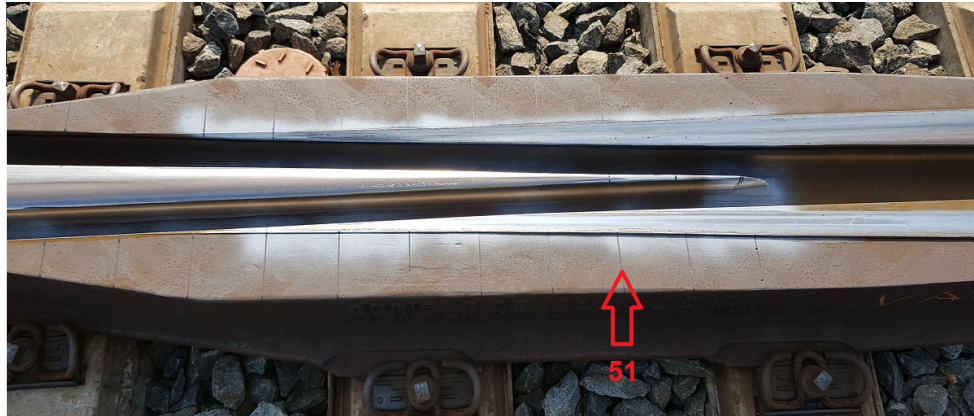
Loivemmissa R600-R900 kaarteissa kontakti voi kuitenkin ajautua kuvan 57 mukaiseen tilanteeseen 3, jossa pyörän ja kiskon epäsopivan muodon ja hieman pienempien sivuttaisvoimien johdosta pyörän pääasiallinen kontakti pysyy koko ajan kulkupinnalla, mutta samanaikaisesti pyörän laipalle muodostuu toinen kontakti kiskon reunan kanssa. Tämä kontakti ei ole kuitenkaan yhtä vahva kuin kulkupinnan kontakti, joten siinä tapahtuu käytännössä ainoastaan luistamista ja se ei näin ollen vaikuta juuri lainkaan ohjautumiseen. Näin ollen pyörä jää ikään kuin jumiin kahden kontaktin tilaan, kun kunnollisia ohjaavia voimia pyörän laipalta ei synny. Kontaktin luistaminen kiskon reunalla lisää tietenkin merkittävästi kulumista, joka johtaa lopulta kuvan 56 mukaisiin kulumismääriin. Tästä syystä näiden yllä kuvattujen kontaktimuotojen syntymistä radan eri kohdissa tulisi tutkia vielä huomattavasti tarkemmin jatkossa esimerkiksi simuloinnin avulla. Tämä vaatisi kuitenkin kattavan vaihdemallin luomista, joka ei ollut tämän projektin puitteissa mahdollista.

Kielisovituksen ja välikiskoalueen ohella koevaihteissa suoritettiin profiilimitauksia myös risteyskärjen kohdalla. Normaalisti tämä kohta on dynaamisten iskukuormitusten takia vaihteen kuluvin teräsosa. Näissä koevaihteissa risteyskärjet eivät ole kuitenkaan kuluneet juuri lainkaan, kuten kuvan 58 poikkileikkausprofiili vaihteesta V330 osoittaa. Kyseinen mittapiste on risteyskärjen kolmas poikkileikkausprofiili, eli se on otettu 20 cm kärjen takaa, jonka sijainti on vielä havainnollistettu kuvassa 59.



Kuva 58. Vaihteen V330 risteyskärjen poikkileikkausprofiili mittapisteessä 3 (ks. kuva 18).

Voidaan havaita, että tässäkin risteysalueen suurinta kulumistilannetta edustavassa poikkileikkauksessa (kuva 58) kulumismäärät ovat todella pieniä, maksimissaan noin 2 mm. Kulumismäärää mielenkiintoisempi havainto on se, että tämä sivukuluminen on tapahtunut siipikiskossa eikä itse risteyskärjessä. Siipikisko ei ole siis ikinä kontaktissa varsinaisen pyörän kulkupinnan kanssa, vaan kulumiseen johtava kontakti on tapahtunut pyörän laipan sisäpinnan ja siipikiskon välillä. Tämä on sinällään aika kriittinen havainto, sillä kuluminen tapahtuu vaihteen kaaren ulkokiskon puolella. Pyöräkerta on todennäköisesti vaihteen kaaren vaikutuksesta ajautuneena sivusuunnassa kohti ulkokiskoa, eli tässä tapauksessa risteyskärkeä. Tällöin pyörän pitäisi olla ennemminkin laippakontaktissa risteyskärjen kanssa ja nimenomaan kaukana laipan sisäpinnan kontaktista siipikiskoon.



Kuva 59. Risteyskärjen poikkileikkausprofiilin 3 sijainti rakenteessa.

Tämä kuluminen viittaa vahvasti siihen, että joko vaihteen tai pyöräkerran mitat ovat ylittäneet toleranssinsa. Vaihteen mittoja voidaan tutkia suoraan laskemalla poikkileikkausprofiileista risteyskärjen i1- ja i2-mitat, jotka ovat siis laippavälyksen leveys suoralla reitillä ja poikkeavalla reitillä. RATO:n osassa 14 (Liikennevirasto 2016) määritellään tämän laippavälyksen nimellimitaksi 44 mm ja kunnossapitotoleransseiksi pääraiteella -1–3 mm. Alla on taulukossa 2 esitettynä vaihteesta V330 lasketut i-mitat jokaisen mitatun poikkileikkausprofiilin kohdalta syksyllä 2016, eli melko pian asennuksen jälkeen. Poikkileikkausprofiilien sijainti on esitetty kuvassa 18.

Taulukko 2. Vaihteen V330 i-mitat jokaisen mitatun poikkileikkausprofiilin kohdalta syksyllä 2016. Kuva on liukuvärjätty siten, että i-mitan nimellisarvo 44 mm on värjätty vihreällä, sitä pienemmät arvot punaisella ja sitä suuremmat arvot violetilla.

Profiilin numero	i1-mitta (Suora raide)	i2-mitta (Poikkeava raide)
1	44,9	45,8
2	43,8	43,4
3	42,9	42,1
4	42,88	42,2
5	42	41,9
6	41,5	41,6
7	41,7	42,3
8	41,9	42,4
9	42,9	42,7
10	44,6	43,3
11	45,8	44,2
12	46,9	45,0
13	47,4	45,5
14	48,2	46,1
15	49	46,8

Taulukosta 2 pystytään havaitsemaan, että laippavällys on useassa kohdassa selkeästi liian kapea. Kunnossapitotoleranssien alaraja 43 mm alitetaan yhteensä 14 poikkileikkauksessa. Tämä yhden millimetrin kunnossapitotoleranssi on hyvin tiukka, mutta sille on syynsä. Laippavällyksen ollessa risteyksen puolella tuo mainittu 43 mm, jää pyöräkerran laippojen sisäpinnan etäisyydeksi 1439 mm ( $1524 \text{ mm} - 43 \text{ mm} - 42 \text{ mm}^1$ ). Tämän täytyy riittää kaikille Suomessa kulkeville pyöräkerroille. GOST-standardissa (GOST 10791-2011) on määritelty pyöräkerran laippojen sisäpinnan minimietäisyydeksi 1437 mm, joten näilläkin arvoilla GOST-standardin mukainen minimipyöräkerta on siis jo 1 mm liian ahdas kulkemaan vaihteen risteyksen läpi. Ahtausongelma on siis aivan ilmeinen ja melko merkittäväkin, kun i-mitan nimellisarvoista poiketaan näin paljon. Kunnossapitäjän tarkastusmittaushistoriaa tutkimalla voidaan vetää johtopäätös, että kyseisen vaihteen V330 laippavällykset ovat olleet kapeita jo ihan uutuuttaan. Myös vaihteen V331 laippavällykset ovat muutamassa poikkileikkauksessa hieman alle toleranssirajojen, joten näiden vaihteiden mangaaniosan valuvaiheessa on tapahtunut selkeästi jotain virheitä. Tämä mangaaniosien laippavällyksen kapeus johtaa siihen, että kapeiden pyöräkertojen on kulutettava itselleen tie vaihteen risteysalueen läpi, jonka nähdään selkeästi tapahtuneen kuvassa 58. Laippavällyksen arvot vuonna 2018 on esitetty taulukossa 3.

*Taulukko 3. Vaihteen V330 i-mitat jokaisen mitatun poikkileikkausprofiilin kohdalta syksyllä 2018. Kuva on liukuvärjätty siten, että i-mitan nimellisarvo 44 mm on värjätty vihreällä, sitä pienemmät arvot punaisella ja sitä suuremmat arvot violetilla.*

Profiilin numero	i1-mitta (Suora raide)	i2-mitta (Poikkeava raide)
1	44,9	45,8
2	45,5	43,6
3	44,0	44,5
4	43,3	44,2
5	42,0	43,6
6	41,4	43,7
7	41,7	43,8
8	41,9	44,0
9	43,0	44,5
10	44,7	45,1
11	45,8	45,9
12	46,9	45,9
13	47,5	46,6
14	48,3	47,2
15	48,9	47,7

Taulukko 3 osoittaa, että laippavällyksen arvot ovat selkeästi muuttuneet vuoteen 2018 mennessä juuri poikkeavalla reitillä. Kaikki kunnossapitorajan alla olevat arvot ovat kasvaneet kulumisen myötä käytännössä nimellismittoihin, joten liikenne on korjannut vaihteen risteyksessä olleen vian. Suoralla reitillä

<sup>1</sup> Vastakiskon puoleisen laippavällyksen nimellismitta on vaihteen e-mitan ja f-mitan erotus  $1524 \text{ mm} - 1482 \text{ mm} = 42 \text{ mm}$



arvot ovat vuorostaan pysyneet kuta kuinkin muuttumattomana. Tämä selittyy sillä, että ahdasta laippavälystä kuluttaa juuri GOST-standardin mukainen kapea pyöräkerta, jota liikkuu ainoastaan vaihteen poikkeavalla reitillä. Vaihteen suoralla reitillä kulkee pelkästään suomalaista henkilö- ja tavaraliikennettä, joiden suomalaiset leveät pyöräkerrat (laippojen sisäpintojen välinen minimietäisyys 1442) eivät ota kontaktia siipikiskojen sivupintoihin risteystä ylitettäessä (Liikennevirasto 2012).

Tällä ahtaudella voi olla pieni merkitys myös vaihteen välikiskoalueen kulumiseen risteyksen jälkeen, sillä raskaan tavarajunan tullessa vaihteen kannan suunnasta ahdas risteys pakottaa ja ohjaa pyöräkerran tiettyyn asentoon, jolloin sen luonnollinen kartiokkuudesta johtuva ohjautuminen häiriintyy ja pyörän kohtauskulma kiskoon nähden ei ole välttämättä optimaalinen.

Yleisesti ottaen voidaan kuitenkin todeta, että risteyksen mangaaninen kärki-elementti on säilynyt tarkastelujakson aikana erittäin hyvässä kunnossa valmistusvirheen kuluttua pois. Edellä mainittuun ahtausongelmaan ja sen merkittävyyteen vaikuttaa luonnollisesti myös se, kuinka kuluneita ovat vaihteiden vastakiskoprofiilit sekä suoralla että poikkeavalla reitillä. Vastakiskoprofiilin muotoa ei tässä projektissa varsinaisesti mitattu millään tavalla, mutta sen kunnosta voidaan tehdä paljon havaintoja silmämääräisen tarkastuksen avulla ja kunnossapitäjän tarkastusmittoja analysoimalla. Kuva 60 havainnollistaa vaihteen V330 vastakiskoprofiilin kulumistilannetta elokuussa 2018.



Kuva 60. Vaihteen V331 poikkeavan reitin vastakisko elokuussa 2018.

Kuva 60 osoittaa selkeästi, että vastakiskoon on kohdistunut merkittävä määrä sivuttaiskontaktia. Vastakiskon kapeimmalla 42 millimetrin nimellimitalla olevalla osuudella näkyy käytännössä yhtenäinen kulumisalue koko vastakisko-profiilin mitalla, josta on hioutunut kuvan 61 mukaisesti pois todella suuria metallipartikkeleja. Tämä kertoo siis hyvin voimakkaasta laipan sisäpinnan kontaktista. Kuva 60 näyttää erinomaisesti myös sen, kuinka vastakiskopukkirakenteen erkaantuessa kontakti hyvinkin lineaarisesti vähenee.





Kuva 61. Vastakiskoprofiilin kulumisen johdosta irronneet metallipartikkelit sekä kiinnityksen modifiointi metallilevyillä vaihteessa V331 elokuussa 2018.

Vastakiskon päistä kiinnitykset ovat täysin alkuperäiset, mutta keskemällä kiinnityksiin on jouduttu järjestelmällisesti lisäämään kuvissa 60 ja 61 näkyviä metallilevyjä, joiden avulla vastakiskoprofiilia saadaan siirrettyä lähemmäksi tukikiskoa ja palautettua laippavälys takaisin lähemmäksi nimellismittaansa. Kunnossapitäjän suorittamat vaihteen tarkastusmittaukset osoittavat, että laippavälys on ollut heidän suorittamassa mittauskohdassa ajankohdista riippuen välillä 39-49 mm nimellismitan ollessa 42 mm. Tälle arvolle ei ole periaatteessa määritetty minkäänlaisia toleransseja, koska se lasketaan virallisesti vaihteen e-mitan ja f-mitan erotuksena, joiden kummankin omat toleranssit mahdollistavat tämän mitan liikkuvan välillä 33-49 mm. Todellisuudessa tällaiset laippavälyksen arvot aiheuttaisivat kuitenkin jo ongelmia varsinkin kapean GOST-standardin pyörän kululle, joten käytännössä vaihteen e-mitta ja f-mitta eivät saisi olla samaan aikaan omien toleranssiensa ääriladoissa.

Voimakkaista laipan sisäpinnan kontakteista kertoo myös se, että syksyllä 2018 vastakiskopukin kiinnityksessä havaittiin katkenneita raideruuveja. Hajonneista raideruuveista tehtyjen silmämääräisten havaintojen perusteella Osa oli rikkoutunut vastakiskopukin ja pölkyn yläpinnan välisestä rajapinnasta leikkautumalla. Tämä tarkoittaa sitä, että vastakiskoon on kohdistunut suuria poikittaiskuormituksia, jotka ovat aiheuttaneet liian suuren leikkausvoiman ruuville. Yksi hajonneista ruuveista oli katkennut ruuvin kannan kohdalta, joka viittaa siihen, että vastakiskoon syntyneet voimat ovat aiheuttaneet vääntömomenttia vastakiskopukkiin. Tämä vääntömomentti on nostanut vastakiskopukkia irti pölkystä ja ruuvin kanta on lopulta murtunut.

Tällaisten sivuttaisvoimien kantaminen vaatisi siis vastakiskopukille huomattavasti järeämmän ruuvikiinnityksen tai vastavuoroisesti kiskon kiinnityksissä käytetyn kulmakappalerakenteen, josta sivuttaisvoimat siirtyvät paremmin pölkkyyn.

Yhteenvedona voidaan todeta, että kiskot ja kielet kuluvat näissä mitatuissa rakenteissa hyvin voimakkaasti. Kulumisen syyt eivät kuitenkaan varsinaisesti ole uudessa elastisessa rakenteessa, vaan kiskon ja pyörän välisen kontaktin epäsopivuudessa. Näissä vaihteissa suoritettut laajat mittausjärjestelyt toivat

kuitenkin esiin myös näitä yleisen tason ongelmia, joka auttaa jatkossa parantamaan vaihderakennetta ja myös siinä kulkevaa kalustoa muiltakin osin kuin pelkästään elastisuuden näkökulmasta.

## 4.4 Tukikiskon ja kielen välinen korkeusasema

Projektin aikana havaitun vahvan kulumisilmiön selvittämiseksi alkuperäistä mittaussuunnitelmaa päätettiin vielä muuttaa syksyllä 2018. Nämä muutokset kohdistuivat kielen korkeusaseman mittaamiseen, jolla katsottiin olevan kunnossapitäjän silmämääräisten tarkastusten perusteella suuri merkitys kulumiselle, koska kielissä katsottiin olevan voimakasta pystykulumista. Uusi kielisovitusalueen elastinen kiinnitysrakenne mahdollistaa teoriassa kielen ja tukikiskon välisen pystysuuntaisen liikkeen, sillä kieli ei ole liikkuvalla osaltaan millään tavalla kiinni vaihdealuslevyssä. Pelkkää tukikiskoä kuormitettaessa kielen kärkialueella koko kiinnitysrakenne vaihdealuslevyineen painuu elastisen välilevyn ansiosta. Vapaana vaihdealuslevyllä lepäävä kieli ei kuitenkaan taivutusjäykkyytensä johdosta painu tässä tilanteessa juuri lainkaan, jolloin kielen ja tukikiskon välinen korkeusasema pääsee muuttumaan. Tätä pystysuuntaisen liikkeen määrää mitattiin ja kuvattiin marraskuussa 2018 sekä Oulun koevaihteessa vaihteessa V331 että Kontiomäen vertailuvaihteessa V963 luvussa 3.4 esitetyillä antureilla.

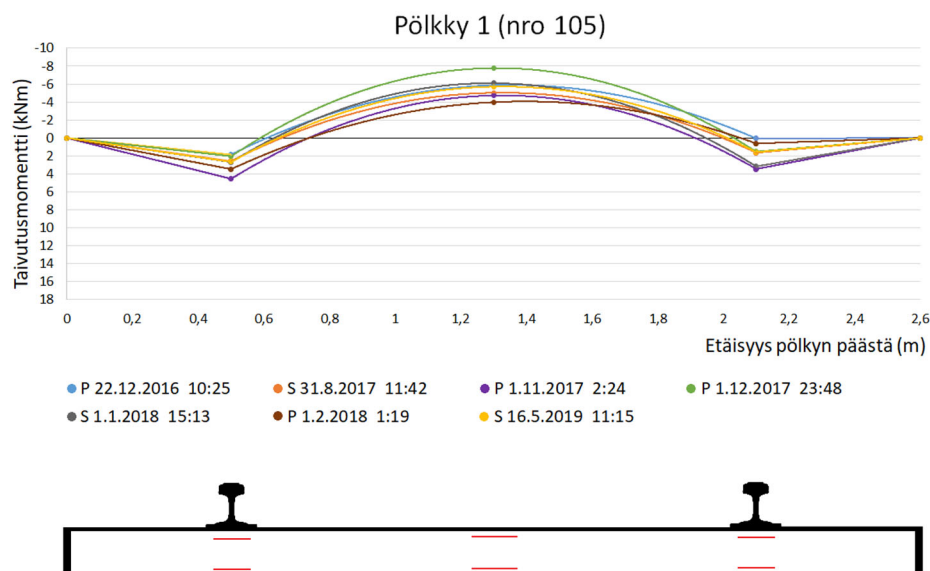
Tulokset osoittivat, että pölkkyjen 110 ja 112 kohdalla elastisen rakenteen vaikutus on käytännössä olematon kielen pystysuuntaiseen siirtymään, eli tukikisko ja kieli liikkuvat toisin sanoen yhtä aikaisesti ilman suurta korkeusvaihtelua sekä Nokelan vaihteessa että referenssinä toimivassa Kontiomäen vaihteessa. Pölkkyjen 103 ja 106 kohdalla käyttäytymisessä on kuitenkin eroja näiden kahden vaihteen välillä. Elastisessa rakenteessa kieli nousee näissä kohdissa mittauksien mukaan noin 1,5–3 mm suhteessa tukikiskoon, joka on jo merkittävä nousu ajatellen kielen pystykulumista. Vanhan rakenteen mukaisessa referenssivaihteessa V963 tällaista nousua ei ollut havaittavissa, vaan itseasiassa tukikiskon ja kielen kulkupintojen välinen etäisyys kasvaa noin 1,5–2,5 mm raskaiden junien ylittäessä vaihdetta kannasta kärkeen päin. Tämä viittaisi siihen, että junan pyörä on kontaktissa kieleen myös aivan vaihteen kärkialueella ja painaa kieltä alaspäin samalla kun tukikisko hieman kaatuu poikittaisvoiman vaikutuksesta ulospäin nostaten täten tukikiskon jalassa olevaa anturin runkoa. Aiemmin luvussa 4.3 esille tuotu pyörän vahva laippakontakti siis selkeästi vaikuttaa myös tämän vaihteen käyttäytymiseen. Laippakontaktin vaikutuksen voi havaita myös siitä, että kielen ja tukikiskon välinen etäisyys ei muutu kielen kärkialueella lainkaan junan ylittäessä vaihdetta kärjestä kantaan päin. Tähän suuntaan kuljettaessa laippakontaktia ei synny vaihteen kärkeen, joka on havaittavissa kuvan 49 pienistä kulumisarvoista kielen kärkialueella. Kielen ja tukikiskon korkeuserot eivät siis johdu suoraan akselipainon aiheuttamasta rakenteen pystysuuntaisesta painumasta, vaan pyörän vahvan sivuttaisliikkeen aiheuttamasta erityistilanteesta, joka saa kontaktin aikaan sellaiseenkin kohtaan kieltä, jossa kontaktia ei ole tarkoitus olla.

Näiden tulosten valossa uusi elastinen rakenne siis aiheuttaa kielen ja tukikiskon välistä pystysuuntaista liikettä nykyistä vaihderakennetta enemmän. Ilman laippakontaktin vaikutusta tämä ero on kuitenkin hyvin pieni, joten elastiset levyt eivät itsessään aiheuta suuria ongelmia vaihteen käyttäytymiselle.

## 4.5 Pölkkyjen kuormitustila

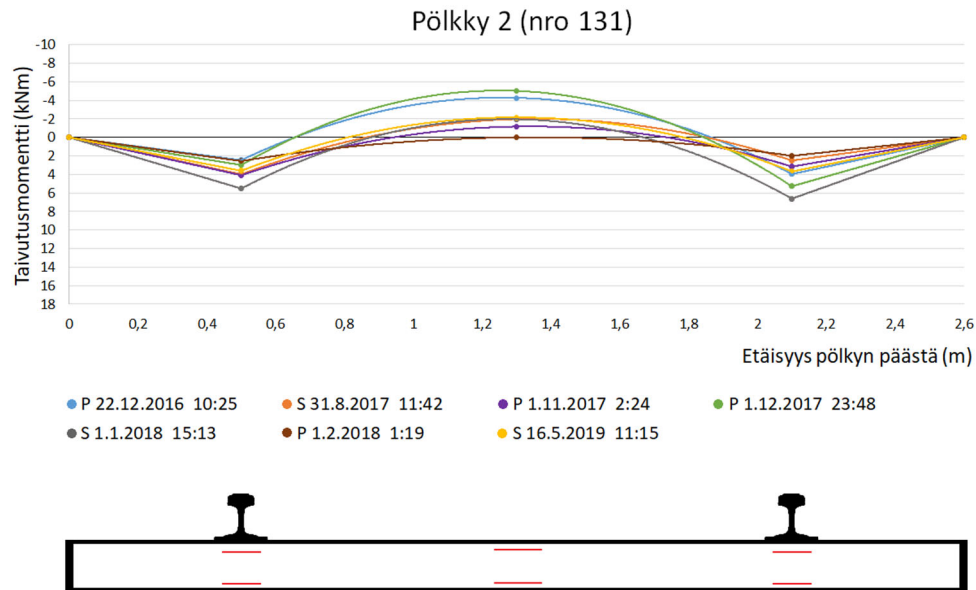
Pölkkyjen kokemaa kuormitustilaa mitattiin luvuissa 2.2.2 ja 3.5 esitetyillä antureilla yhteensä 4 eri pölkystä. Anturit ovat sijoitettu sekä pölkyn yläpinnan että alapinnan läheisyyteen, joiden avulla pölkylle voidaan laskea taivutusmomentti. Kuten kaava 1 sivulla 28 osoittaa, momentti on matemaattisesti pölkyn poikkileikkauksen jokaisessa pisteessä täysin sama, joten näiden antureiden mittaamasta pölkyn venymästä tulisi muodostua sama taivutusmomentti sekä pölkyn ylä- että alapintaan. Kalibroinnista saaduilla kertoimilla ylä- ja alapinnan anturit antavat varsinkin pölkyn 4 kohdalla hieman eri suuruisen tuloksen taivutusmomentille, joten näistä tuloksista on laskettu keskiarvo, joka edustaa parhaiten pölkyn taivutusmomenttia kyseisessä kohdassa.

Näiden neljän koepölkyn kokemat taivutusjännitykset junan ylitysten aikana ovat esitetty kuvissa 62-65. Kaikissa kuvissa kuormituksena on ollut kyseisten junien Sr2 veturi.



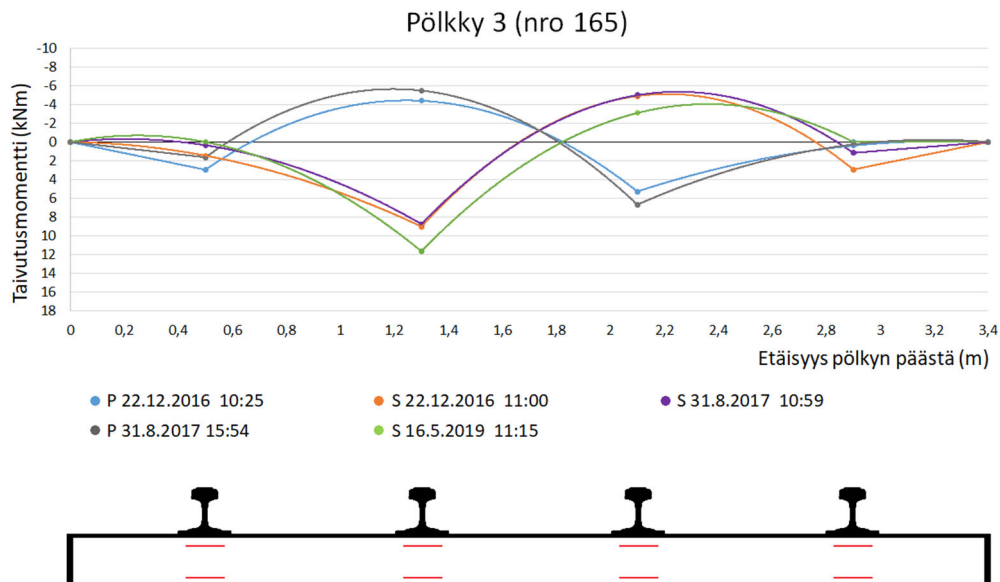
Kuva 62. Vaihteen pölkyn numero 105 taivutusmomentti junan ylitysten aikana. Kirjain P tarkoittaa, että vaihdetta kuormittava juna on liikkinut poikkeavaa reittiä ja kirjaimella S merkitään suoran reitin junat.

Kuten kuvasta 62 voidaan havaita, kielisovitusalueella sijaitsevan pölkyn 105 taivutusmomentit ovat kaikilla junan ylityksillä hyvin saman kaltaisia. Suurimmat positiiviset taivutusmomentit suoraan kiskojen alla ovat keskimäärin noin 2–4 kNm luokkaa, jotka ovat varsin maltillisia arvoja. Keskelle pölkkyä muodostuvat negatiiviset momentit ovat hieman suurempia vaihteluvälin ollessa noin 4–8 kNm. Kun vertaillaan näitä arvoja kuvassa 23 esitettyihin Väyläviraston määrittelemiin teknisiin toimitusehtoihin, huomataan niiden olevan reilusti alle pölkyn mitoituskuorman. Tässä pölkkyssä taivutusmomentti ei siis aiheuta minkäänlaisia ongelmia, kuten olettaa sopiinkin.



Kuva 63. Vaihteen pölkyn numero 131 taivutusmomentti junan ylitysten aikana. Kirjain P tarkoittaa, että vaihdetta kuormittava juna on liikkunut poikkeavaa reittiä ja kirjaimella S merkitään suoran reitin junat.

Käytännössä saman suuruiset taivutusmomentit muodostuvat myös kielen kanta-alueelle pölkkyyn 131. Suoran ja poikkeavat reitin kiskot ovat tässä kohdassa vielä saman vaihdealuslevyn päällä, joten taivutusmomentteihin ei muodostu mitään eroa poikkeavan ja suoran reitin junien välillä. Pölkyn kuormitus on siis täysin homogeenistä vielä kielen kannassakin.

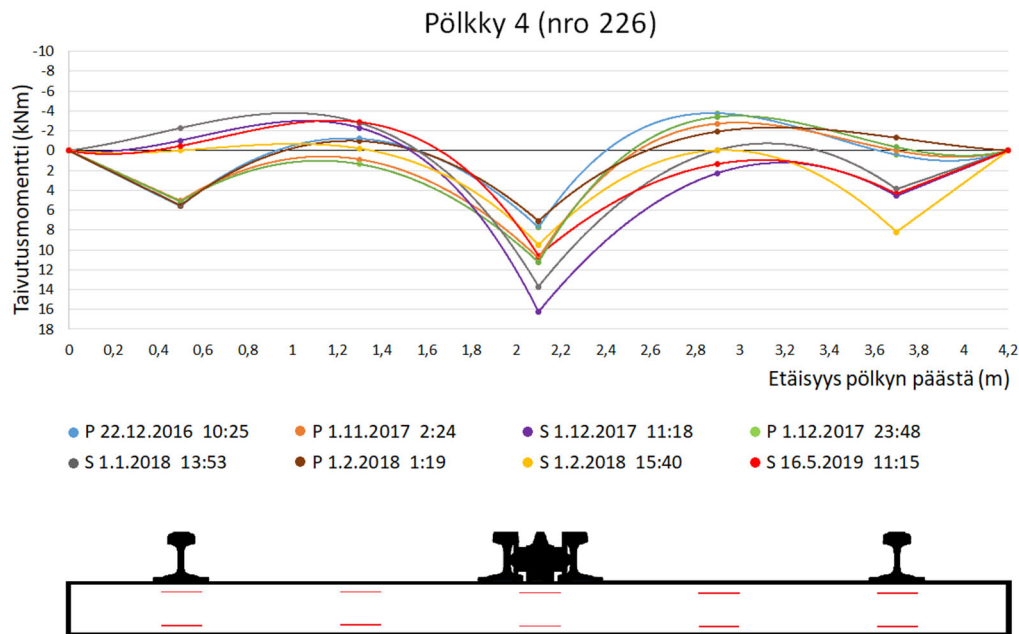


Kuva 64. Vaihteen pölkyn numero 165 taivutusmomentti junan ylitysten aikana. Kirjain P tarkoittaa, että vaihdetta kuormittava juna on liikkunut poikkeavaa reittiä ja kirjaimella S merkitään suoran reitin junat.

Seuraavan älypölkyn kohdalla pölkkyssä numero 165 kuormitus ei kuitenkaan ole enää millään tapaa homogeenistä eri reittien välillä, eikä edes kuormitettujen kiskojen välillä, kuten kuva 64 osoittaa. Kuormituksen ollessa pölkyn pituuteen nähden epäsymmetristä, myös sen aiheuttama taivutusmomentti on selkeästi epäsymmetristä siten, että suurimmat taivutusmomentit muodostuvat aina pölkyn keskellä olevien kiskojen kohdalle vaihdellen noin 4–12 kNm välillä. Pölkyn päissä olevien kiskojen alle muodostuu hyvin lähelle sama noin 2–4 kNm momentti, mitä pölkkyjen 105 ja 131 tapauksessakin. Tämä viittaa siis vahvasti siihen, että tuentatilanne pölkkyjen päissä on kuta kuinkin samanlainen kaikissa näissä kolmessa mitatussa pölkkyssä. Keskellä tuenta ei kuitenkaan ole jostain syystä aivan yhtä hyvää ja pölkky pääsee näin ollen taipumaan selkeästi enemmän kuormituksen vaikutuksesta, vaikka pyöräpaino onkin kummassakin kiskossa kuormituksen aikana käytännössä täysin sama. Tämä on hyvin tärkeä huomio, joka alleviivaa sitä, että pitkässä vaihdepölkkyssä on äärimmäisen tärkeää, että kaikkien kiskojen alla olisi mahdollisimman samanlainen tuentatilanne, jolloin momentitkin jakaantuisivat tasaisemmin.

Tämä yhdenmukainen tuentatilanne voi kuitenkin olla hyvin vaikea saavuttaa, sillä pitkät pölkkyt ovat kuvan 40 mukaisesti usein hieman kuperia. Tällöin muodostuu helposti tilanne, jossa pölkyn päihin muodostuu vahvempi kontakti sepelin kanssa, mutta pölkky jää keskeltä hieman ikään kuin ilmaan. Tilannetta vaikeuttaa tietenkin lisäksi se, että nämä pölkkyt tuetaan käytännössä kahdella erillisellä tukemiskoneen ajolla. Ensimmäisellä ajolla tuetaan suoran puolen kiskot, eli kuvan 64 tapauksessa kiskot 2 ja 4. Tämän jälkeen toisella ajolla tuetaan poikkeava puoli, eli kiskot 1 ja 3. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että varsinkin kiskon 2 tuentatilanne saattaa muuttua radikaalistikin viereistä kiskoa 3 nostettaessa ja tuettaessa. Ja lopputuloksena kummatkin näistä kiskoista voi jäädä huonolle tuennalle.

Tästä pölkyn keskiosan hieman heikommasta tuentatilanteesta kertoo myös se, että momentit ovat ajan myötä kasvaneet kiskon 2 alapuolella. Mittauksen alkaessa vuonna 2016 taivutusmomentit olivat tässä kohdassa noin 8–9 kNm luokkaa, mutta viimeisimmissä mittaustuloksissa keväällä 2019 taivutusmomentti on kasvanut jo lähes 12 kNm:iin. Tämän pölkyn antureissa olleiden ongelmien takia poikkeavan reitin kiskoista ei saatu enää luotettavia tuloksia vuoden 2019 aikana, joten ajan vaikutusta kiskon 3 kohdalla ei pystytty valitettavasti arvioimaan. Oletettavaa kuitenkin on, että myös siinä tuentatilanne on hieman heikentynyt ajan saatossa. Momenttirajoihin vertailtaessa nykyiset taivutusmomentin tasot eivät vielä pitäisi aiheuttaa minkäänlaisia ongelmia pölkyn toiminnalle, mutta tätä pölkkyä ja varsinkin sen momentin mahdollista muuttumista pitäisi ehdottomasti seurata tulevaisuudessa lisää anturiongelmiin korjaamisen jälkeen.



Kuva 65. Vaihteen pölkyn numero 226 taivutusmomentti junan ylitysten aikana. Kirjain P tarkoittaa, että vaihdetta kuormittava juna on liikkunut poikkeavaa reittiä ja kirjaimella S merkitään suoran reitin junat.

Viimeinen älypölkky sijoitettiin vaihteessa suoraan risteyskärjen alle pölkky-numerolla 226. Tässä pölkkyssä on myös havaittavissa edellisen pölkyn tapaan pölkyn risteyskärjen alla huomattavasti suuremmat taivutusmomentin arvot pölkyn päihin verrattuna. Tässä pölkkyssä taivutusmomentti on tietyllä junilla jo noin 16 kNm tasolla, jota voidaan pitää jo melko suurena rasituksena. Edellistä tuloksista poiketen myös momentin vaihteluväli on selkeästi suurempi, sillä osa junista muodostaa risteyskärkeen vain noin 7 kNm taivutusmomentin, eli minimin ja maksimin suhde on yli kaksinkertainen. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että risteyskärkeen kohdistuu sen epäjatkuvuuskohdan takia kalustosta kunnosta riippuen vaihtelevia dynaamisia iskukuormituksia, jotka ovat tietenkin suoraan verrannollisia taivutusmomentin suuruuteen.

Kuten kappaleen 4.1 kuvista 32 ja 33 voidaan kuitenkin havaita, suuret taivutusmomentin arvot risteyskärjen alla eivät tarkoita sitä, että pölkky lopulta liikkuisi kovinkaan paljoa. Suuria taivutusmomentin arvoja muodostuu, koska pölkyn tukeutuminen sepeliin on pölkyn matkalla hyvin erilaista. Pitkä vaihdepölkky tukeutuu kummastakin päästä todella tehokkaasti, mutta risteyskärjen epäjatkuvuuskohdan dynaamiset iskut sekä leveän teräsosan aiheuttamat vaikeudet tuentahakuille heikentävät tuentatilannetta pölkyn keskellä. Koska pölkky tuetaan tukemiskoneella vain näistä kolmesta pisteestä, keskimmäisen tuennan onnistumisen merkitys on todella suuri. Jos risteyskärjen tuenta epäonnistuu tai tuki heikkenee jostain syystä ajan myötä, pölkylle voi pahimmassa tapauksessa muodostua todella pitkä, käytännössä noin 3 metrinen, tukematon osuus, joka lisäksi vastaanottaa jatkuvasti suuria dynaamisia kuormia keskelle tukematonta osuutta. Tämän tilanteen seuraus näkyy juuri kuvan 65 kaltaisena taivutussuppilon laajentumisena ja momentin kasvuna pölkyn keskiosassa. Kuvan 65 tilanteessa violetilla värillä näkyvästä suurimmasta taivutusmomenttikäyrästä voidaan havaita, että taivutussuppilo on hyvin laaja ja taivutusmomentin merkki ei vaihdu käytännössä lainkaan negatiiviseksi pölkyn oikealla puolella. Tämä kertoo siitä, että kyseiselle pölkylle muodostuu tietyissä kuormitusolosuhteissa



pitkiäkin tukeutumattomia osuuksia, jolloin keskiosan rasitukset kasvavat. Onneksi suurimmassa osassa kuvan 65 kuormituksista pölkky tukeutuu sepeliin raiteiden keskiosalta, jolloin rasituksen kiskon kohdalla jäävät heti maltillisemmiksi, kuten esimerkiksi 22.12.2016 mitatuista taivutusmomenteista nähdään.

Näiden ongelmien välttämiseksi tällaisia vaihdepölkkyjä tulisi tukea myös pölkyn kuormittamattomalta osuudelta kiskojen välistä. Tällöin taivutuksen jännevälin olisi vaikeampi kasvaa yli raideleveyden mittaiseksi ja kuormitukset jakaantuisivat tasaisemmin koko pölkyn pituudelle. Normaaleille linjapölkkyille tällainen keskiosan tuenta on ehdottoman kiellettyä, koska silloin pölkky voi alkaa kantaa pelkästään yhdestä pisteestä keskiosaltaan ja sille alueelle muodostuvat negatiiviset taivutusmomentit hajottaisivat pölkyn. Linjapölkkyssä keskiosa jätetään siis täysin tukematta ja kiskon alla olevien tuentapisteiden heikentyessä koko pölkky lähtee vajoamaan tai kallistumaan. Pitkässä vaihdepölkkyssä tukipisteitä muodostuu kuitenkin aina useita, joista osa on lisäksi kuormittamattomia junan käyttäessä aina vain toista kahdesta reitistä. Tämä tarkoittaa sitä, että pitkä vaihdepölkky ei varsinaisesti pääse kuormituksen aikana vajoamaan tai muuttamaan orientaatiotaan juuri yhtään vaan ainoastaan taipumaan. Tällöin tärkeimmäksi seikaksi tukemisessa muodostuu juuri se, että nämä taivutuksen tukipisteet eivät saa olla liian kaukana toisistaan.

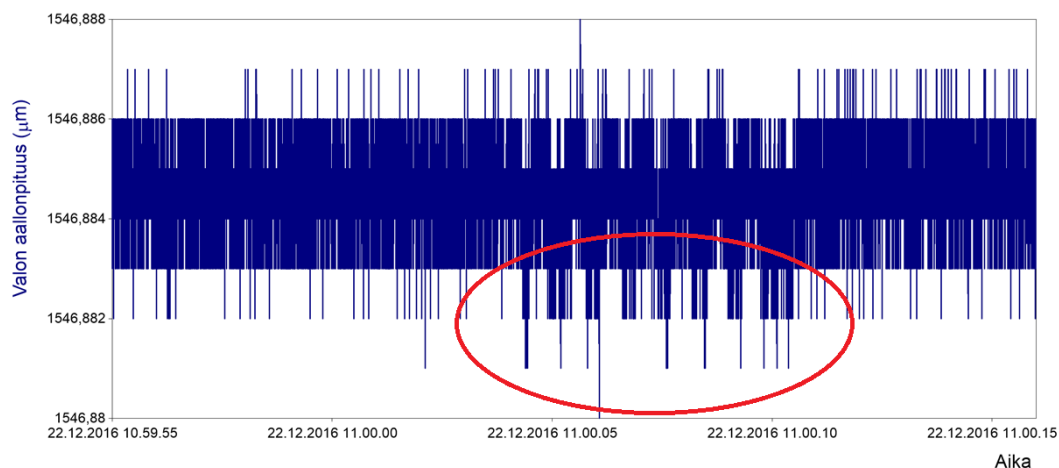
Varsinaisten taipumatulosten analysoinnin ohella tämän projektin tavoitteisiin kuului myös arvioida kyseisen mittaustekniikan toimivuutta ja hyödyllisyyttä vaihdealueella ja yleensäkin rataympäristössä. Valokuituantureilla varustetut pölkkyt asennettiin rataan jo kesällä 2016, joten kokemuksia mittaustavan toimivuudesta ja hyödyllisyydestä saatiin tässä ajassa hyvinkin paljon.

Tässä luvussa esitetyt momenttikuvaajat kertovat hyvin siitä, että tämän tyyppinen mittausta on erittäin hyödyllistä ja tarpeellista varsinkin vaihteen pitkissä pölkkyissä, jossa kuormitukset eivät ole symmetriset. Tällaiset mittaukset tuovat hyvin esiin mahdollisen huonon tuentatilanteen kriittisissä kohdissa ja saattavat parhaassa tapauksessa estää pölkyn halkeamisen, kun tilannetta tiedetään korjata oikealla tavalla ja oikealla hetkellä. Mittaustapa osoitti myös sen, että anturit itsessään pölkyn sisällä pystyvät parhaassa tapauksessa mittaamaan luotettavasti useita vuosia. Tämä on aivan keskeinen asia, sillä betonipölkyn toimivuuden kannalta tärkeintä on juuri pitkän aikajänteen mittaukset tuentatilanteen muuttuessa koko ajan dynaamisten kuormien alla.

Näiden positiivisten asioiden rinnalla mittausten aikana tuli kuitenkin esille myös tiettyjä ongelmakohtia. Suurin osa näistä ongelmista liittyi siihen, että kyseinen mittaustapa on vielä prototyyppiasteella ja pölkyn taipumaa mittaavat laitteet ja tarvikkeet itsessään eivät ole vielä täysin valmiita tehokkaaseen pitkän aikavälin mittaamiseen. Pölkyn ja mittalaitteen välillä käytetyt valokuitujohtot olivat rakenteeltaan liian ohuita ja sitä kautta liian hauraita asennettavaksi sepelin joukkoon. Myös johtojen liittimet jouduttiin kaikki hitsaamaan radalla uudelleen johtojen asennuksen jälkeen, koska yksittäisen valokuidun ja liittimen välinen hitsisauma ei kestänyt lainkaan asennuksen tuomaa kuormitusta. Kyseisiä mittalaitteita ja johtoja oli käytetty aiemmin vain hyvin lyhytkestoissa manuaalimittauksissa, joten tällaisia ongelmia ei valmistajan mukaan ollut ennen havaittu. Luultavasti juuri tämä johtojen ja liittimien herkkyyys johti siihen, että pölkystä 3 saatiin lopulta hyvin vähän luotettavaa dataa, joka oli melko ikävä takaisku mitattaessa kuitenkin vain 4 pölkkyä.

Rataympäristössä tällaiset johdot ja laitteet joutuvat aina hyvin suurelle rasitukselle, joten niiden pitää olla kestäviä ja vankkarakenteisia toimiakseen tällaisessa pitkäaikaismittauksessa. Valokuitutekniikkaa käytettäessä tulee siis jatkossa keskittyä huomattavasti enemmän johtojen kestävyyteen, sillä valokuitu on hyvin herkkä materiaali, joka ei kestä käytännössä lainkaan taivutus tai vetokuormitusta. Nämä ongelmat ovat kuitenkin ratkaistavissa paksummilla kaapeleilla, joissa kuminen suojaputki valokuidun ympärillä varmistaa, ettei varsinainen valokuitu joudu missään tilanteessa taivutukselle tai vedolle.

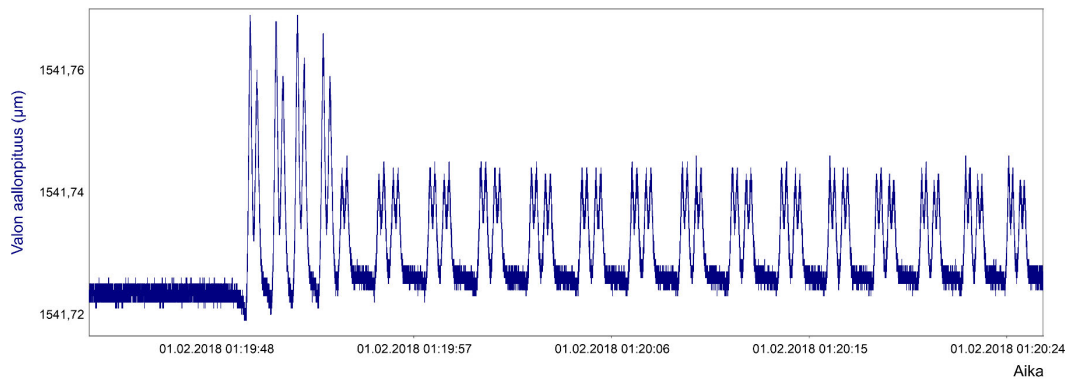
Näiden asennusteknisiin asioihin liittyvien ongelmien ohella todettiin myös toinen heikkous, joka vaikuttaa vahvasti mittaustulosten käytettävyyteen. Kuten luvussa 2.2.2 todettiin, älypölkkyjen mittaustulokset perustuu valokuidussa kulkevan valon aallonpituuden mittaamiseen ja sen muuttumiseen pölkyn taipuessa. Tämä aallonpituuden muutos mitataan mikrometreissä, jolloin tarvitaan hyvin tarkkaa mittaustekniikkaa muutoksen havaitsemiseen. Tämä tarkkuus loi selkeästi haasteita mittausten tulkinnessa. Kuvassa 66 on esitetty täysin käsittelemätön pölkyltä tuleva aallonpituuden signaali, jossa on punaisella ympyrällä korostettu junan aiheuttama muutos signaalin tasoon.



Kuva 66. Pölkyn 3 anturin numero 5 mittaama valon aallonpituus junan ylityksen aikana. Punaisella ympyrällä on korostettu ajanhetkeä, jolloin juna ylittää kyseisen pölkyn.

Kuvaa 66 tarkastelemalla voidaan nopeasti sanoa, että junan aiheuttamaa muutosta anturin arvoon on hyvin vaikea havaita. Mittalaite havaitsee anturin arvon muuttuvan lepotilassaan jatkuvasti  $0,005 \mu\text{m}$  amplitudilla, jota voidaan yksikkö huomioon ottaen pitää hyvin pienenä muutoksena. Mutta ongelma muodostuu se, että junan kuormittaessa kyseistä pölkkyä varsinainen kuormituksen tuoma muutos anturissa ei ole kuin  $0,004 \mu\text{m}$ . Anturin signaali-kohinasuhde on siis jopa alle yhden, jota voidaan yleisesti ottaen pitää hyvin heikkona arvona. Kalibroitimittausten mukaan valon aallonpituuden ( $\mu\text{m}$ ) ja pölkkyyn kohdistuvan taivutusmomentin ( $\text{kNm}$ ) välinen kalibroitikerroin on tässä anturissa noin 486, jolloin tällainen  $0,004 \mu\text{m}$  muutos anturissa tarkoittaa  $1,9 \text{ kNm}$  taivutusmomenttia. Kyseessä on siis ihan merkittävä muutos, joka tulisi pystyä jo tarkasti mittaamaan.

Kaikista herkimmissäkin antureissa kalibrointikertoimet olivat noin 110 tasolla, jolloin kyseisen anturin  $0,005\ \mu\text{m}$  peruskohina tarkoittaa  $0,55\ \text{kNm}$  taivutusmomenttia. Tämä on siis toisin sanoen parhaimman anturin mittaustarkkuus, jota ei voida sitäkään pitää vielä erityisen hyvänä arvona. Tämän anturin käsittelemätön signaali tyhjän tavarajunan ylityksen aikana on havainnollistettu kuvassa 67. Tyhjtä tavaravaunua tuottavat tähän pölkkyyn noin  $2\ \text{kNm}$  taivutusmomentin, joten se vastaa aika tarkasti kuvan 66 kuormitustilannetta.



Kuva 67. Pölkyn 1 anturin numero 4 mittaama valon aallonpituus tavarajunan ylityksen aikana.

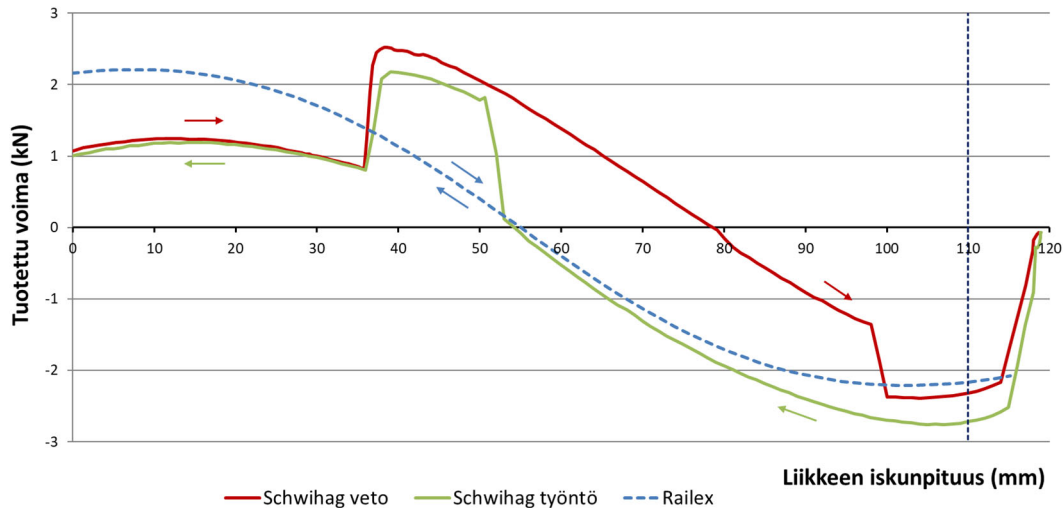
Tulevaisuudessa tällaisten valon aallonpituuksien mittaaminen vaatisi siis vielä entistäkin tarkempia mittalaitteita tai jonkinlaista automaattista datan suodattamista, jolla kohinaa saataisiin pienennettyä ja näin ollen mittatarkkuutta parannettua.

Kokonaisuus huomioon ottaen älypölkkyt tarjoavat kuitenkin todella varteenotettavan vaihtoehdon ongelmallisten pölkkyjen taipumakäyttäytymisen tarkempaan tutkintaan. Kun anturit asennetaan pölkyn valuvaiheeseen huolellisesti pölkyn raudoituksiin, niillä voidaan mitata luotettavasti useita vuosia, joka on selkeä etu esimerkiksi pölkyn pintaan asennettaviin venymäliuska-antureihin verrattuna. Valokuituantureiden ja niitä mittaavien mittalaitteiden hinta on ainakin vielä nykyisellään vielä melko korkea, joten useita kymmeniä seuranta-kohteita ei luultavasti ole tällä tekniikalla taloudellista pystyttää. Mutta kohteissa, joissa pölkkyjen geometriset ongelmat aiheuttavat jatkuvasti suuria kunnossapitokustannuksia, tällaiset älypölkkyt voivat olla hyvä ratkaisu tuomaan lisää tietoutta ongelman juurisyistä.

## 4.6 Uusien kääntöavustimien voimantuotto ja toiminta koevaihteissa

Kuten luvussa 2.2.1 kerrottiin, Oulun kummassakin koevaihteessa käytettiin lähtökohtaisesti tavallisesta vaihderakenteesta poikkeavia kahdella erillisjousella varustettuja kääntöavustimia, koska uusi ulkoisilla lukoilla varustettu Siemens S900K kääntölaite liikuttaa vaihteen kielä eri aikaisesta lyhyen vaihteen tapaan. Tällöin kiinteällä tangolla varustettua Railexia ei katsottu suunnitelmassa sopivaksi komponentiksi näihin vaihteeseen. Vaihteessa V330 päätettiin käyttää Suomessa aikaisemminkin käytettyä VAE:n valmistamaa jousivippeä (kuva 4) ja vaihteessa V331 Schwiagin valmistamaa Spring Device-laitetta, joka suunniteltiin varta vasten prototyyppiä tähän projektiin. Koska näitä Schwiagin

valmistamia laitteita ei oltu käytetty missään muualla aikaisemmin, tuli niiden toiminta varmistaa erillisillä laboratoriotesteillä. Vaihteen kärkialueella käytettävää pidemmällä iskupituudella olevaa kääntöavustinta kuormitettiin kuvan 24 mukaisessa testipenkissä, josta saatiin selville kuvan 68 mukainen laitteen tuottama voimakäyrä koko 110 mm liikepituuden matkalla.



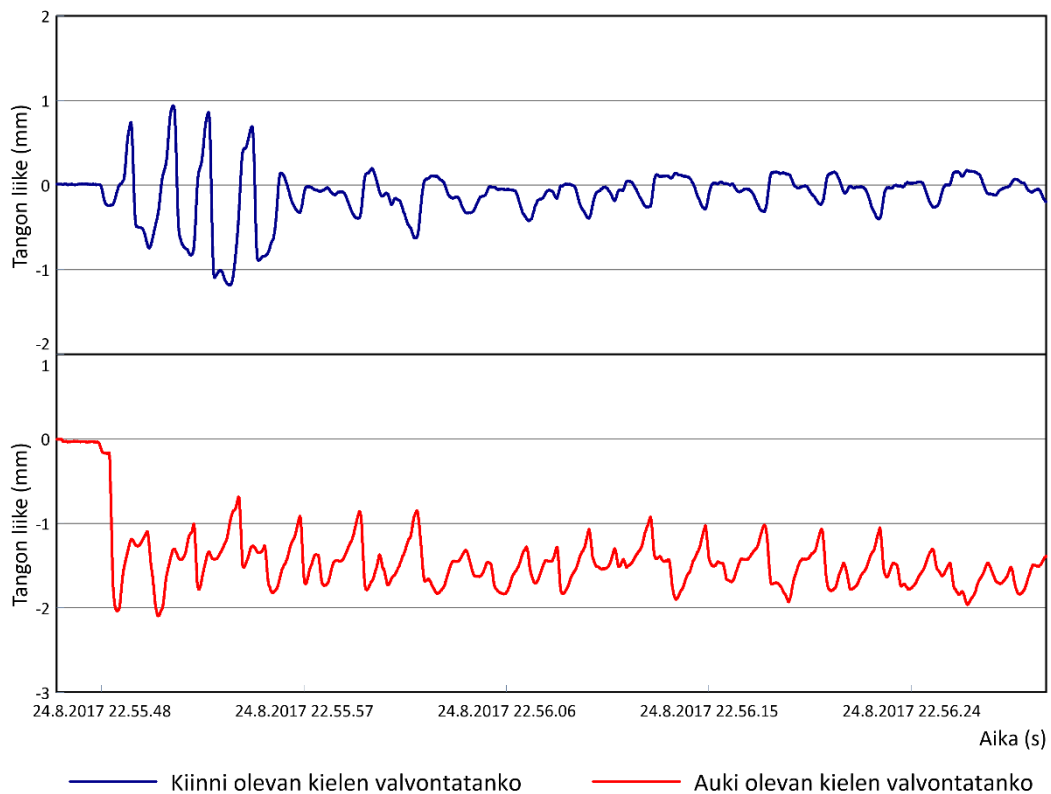
Kuva 68. Schwihagin valmistaman kaksijousisen Spring Device-kääntöavustimen voimakäyrä avointa kieltä vedettäessä ja kiinni olevaa kieltä työnnettäessä. Referenssiarvona myös nykyisin käytetyn Railexin voimakäyrä työntö ja vetotilanteessa.

Kuvasta 68 havaitaan, että uuden Schwihagin laitteen voimakäyrä on huomattavasti monimuotoisempi kuin nykyisin käytetyn Railexin vastaava. Railexissa voimantuotto perustuu siihen, että kiinteään tankoon tuotetaan käytännössä yhteen kiinnityspisteeseen tietty jousivoima, joka tuottaa siten tangon liikkuessa laitteelle yhden jatkuvan ja symmetrisen voimakäyrän. Uudessa kahdella erillisjousella ja niiden välisellä hahlomekanismilla varustetussa laitteessa (katso luku 2.2.1) voimantuotto määräytyy vuorostaan sen mukaan, onko tietyssä kohtaa liikettä käytössä vain yksi jousi vai kummatkin. Purkamalla uuden laitteen voimakäyrä eri osakokonaisuuksiin nähdään, että ryhdyttäessä vetämään (punainen käyrä) avointa kieltä vaihteen käännön alkaessa kohti käyttöasentoansa, liikettä vastustaa aluksi vain avoimen kielen puoleinen jousi ja kieli lähtee liikkeelle noin 1 kN voimalla. Samalla lähtee liikkeelle myös jousimekanismeja yhdistävä hahlotanko, mutta hahlon takia kiinni oleva kieli ja sen jousimekanismi eivät liiku vielä mihinkään. Laitteen jousia yhdistävän hahlotangon hahlon pituus on 35 mm, joten liikkeen edetessä 35 mm saakka hahlotanko ottaa liikkeeseen mukaan myös kiinni olevan puolen jousimekanismin ja liikettä vastustava voima kasvaa välittömästi noin 2,5 kN:iin. Tästä eteenpäin laitteen kummatkin tangot liikkuvat siis yhtäaikaaisesti. Liikkeen edetessä jousimekanismien kulma-asemat muuttuvat ja liikettä vastustava voima pienenee. Liikkeen ollessa noin 80 mm kohdalla auki olevan kielen puoleinen jousimekanismi on kääntynyt jo yli keskiasemansa ja se avustaa jo kääntöliikettä yhtä suurella voimalla, jolla jälkimmäinen jousimekanismi vielä vastustaa. Tällöin jousivoimien summa on nolla, kuten kuvasta 68 voidaan havaita. Kielet kääntyvät tässä kohdassa kuitenkin vielä vahvasti vaihteenkääntölaitteiden avustamana, joten nämä voimat ohjaavat kääntöavustimenkin tämän nollavoiman ylitse. Liikkeen jatkuessa avittavan jousimekanismin kulma-asema vain paranee koko ajan ja vastustavan jousimekanismin kulma-asema huononee,

jolloin jousien kokonaisvoima muuttuu liikettä avustavaksi. Näin edetään aina noin 100 mm iskupituuteen saakka, jonka jälkeen myös kiinni olevan kielen puolella oleva mekanismi on saavuttanut keskiasemansa. Tämän mekanismin vaihtaessa voiman suuntaansa kiinni olevan puolen tanko ampaisee välittömästi hahlotangon hahlon pituuden verran vapaasti kohti toista pääteasemaansa ja kokonaisjousivoima muuttuu hetkessä noin -1,3 kN:sta -2,3 kN:iin. Kääntöliikkeen viimeisten 10 millimetrien aikana kummatkin jouset siis avittavat liikettä ja saa kielet asettumaan pääteasemiinsa ja lopullinen kääntyneeseen kieleen vaikuttava pitovoima jää noin -2,3 kN tasolle. Etummainen jousimekanismi painaa kieltä kiinni noin 1,3 kN voimalla ja taaimmainen noin 1 kN voimalla. Tällöin uusi kääntö toiseen suuntaan lähtisi jälleen liikkeelle vetämällä auki olevan puolen jousimekanismia tuolla 1 kN voimalla.

Kuvaan 68 on piirretty myös vihreä voimakäyrä, joka kuvaa sitä voimaa, joka vaadittaisiin, jos laite haluttaisiin kääntää toiseen asemaan kiinni olevaa kieltä työntämällä. Varsinainen vaihteenkääntöliikkeen suorittama kääntösekvenssi tapahtuu siis aina tällä punaisen käyrän mukaisella vetotekniikalla, mutta laitteen käytön kannalta on hyvin tärkeää ymmärtää myös se, minkälaisella ulkoisella voimalla laitteen pystyisi kiinni olevalta puolelta avaamaan. Työntämällä liikutettaessa kummatkin jouset ovat alusta asti yhdessä vastustamassa liikettä ja kokonaisvoima pysyy vastustavana aina 55 mm asti hyvin samaan tapaan kuin Railexilläkin. Toinen jousimekanismeista on kääntynyt jo hieman ennen tätä pistettä liikettä avustavaan suuntaan, mutta tässä kohdassa jälkimmäinenkin jousimekanismeista kääntyy liikettä avustavaksi ja kääntöavustimen tangot ikään kuin karkaavat työntävältä voimalta kohti toista pääteasemaansa ensin kummankin jousen voimalla (kuvan 68 liikeväli 55 -> 35 mm) ja sitten vielä ainoastaan toisen jousen voimalla (kuvan 68 liikeväli 35 -> 0 mm). Laite karkaa siis toiseen pääteasemaansa aivan samassa kohdassa kuin Railexikin, mutta erillisjousien takia se tekee sen hieman aggressiivisemmin. Tämä karkaava liike ei ole kuitenkaan käytön aikana millään tavalla todellinen, koska kääntöavustinta ei missään tilanteessa työnnetä tällaisia pituuksia.

Tämän perusteella voidaan todeta, että uusi jousirakenne kestää siis kiinni olevaan kieleen kohdistuvia kuormituksia aivan yhtä hyvin kuin nykyinen Railex. Laitteiden merkittävin ero voimien kannalta on juuri auki olevan kielen kiinnipitovoimassa. Nykyinen Railex pitää kumpaakin kieltä käytön aikana kiinni samalla noin 2 kN voimalla, mutta uuden laitteen pitovoima avoimelle kielelle on vain 1 kN. Tämän asian vaikutukset voidaan nähdä kahdella tavalla. Se on toisaalta hyvä asia, sillä uuden laitteen kanssa avoimen kielen liikkeelle saaminen ei vaadi niin suuria voimia, jolloin taivutusmomentit kielessä vähenevät ja kieli lähtee luonnollisemmin ja aiemmin vaihteenkääntölaitteen ohjaamaan suuntaan. Tämä vähentää todennäköisesti myös vaihteenkääntölaitteen virrankulutusta käännön aikana. Pitovoiman vähyyys voidaan kuitenkin nähdä myös laitteen heikkoutena, sillä se lisää tietenkin myös avoimen kielen värähtelyriskiä junan yliajon aikana. Näistä kahdesta näkökannasta jälkimmäinen riskinäkökanta on ehkä merkittävämpi, joten näiden laitteiden koekäytön on tärkeää mitata valvontatankojen liikettä kuormituksen aikana. Nämä liikkeet mitattiin vaihteesta V331 siirtymäanturien avulla ja tankojen liikkeet sekä kiinni olevalla puolella että auki olevalla puolella on esitetty kuvassa 69.



Kuva 69. Vaihteen V331 kielen kärkialueen kääntöavustimen kohdalla olevien valvontatankojen liike junan ylityksen aikana. Negatiiviset arvot kuvaavat kielen liikettä aukeavaan suuntaan ja positiiviset arvot liikettä kohti tukikiskoa.

Kuva 69 osoittaa, että kääntöavustimen kohdalla olevissa tarkastustangoissa on havaittavissa selkeää liikettä junan ylitysten aikana. Kiinni olevan kielen tarkastustanko liikkuu suurimmillaan noin 1 mm kumpaankin suuntaan kuormituksen johdosta ja auki olevan puolen valvontatanko noin 1–2 mm aukeavaan suuntaan. Nämä kummatkaan liikkeet eivät sinällään ole vielä erityisen kriittisiä, sillä tarkastustankojen sekä myös varsinaisten kääntötankojen kiinnityssokissa ja -holkeissa tiedetään olevan keskiarvoisesti noin 0,5–1 mm välyksiä. Tämä tarkoittaa sitä, että valvontatangot pääsevät uusissakin vaihteissa vapaasti liikkumaan kuormituksen aikana noin 0,5–1 mm verran. Mitattu siirtymä ei ole juurikaan suurempi kuin nuo arvot, joten valvontatankojen voidaan sanoa pysyvän hyvin paikoillaan kuormituksen aikana. Avoimen puolen valvontatangossa on lisäksi havaittavissa, että maksimaalinen 2 mm aukeavaan suuntaan oleva liike tapahtuu heti ensimmäisen kuormittavan akselin kohdalla. Tämä viittaa siihen, että tangon asemassa tapahtuu välittömästi kuormituksen alkaessa noin 1,5 mm vapaa absoluuttisiirtymä, joka johtuu välyksien poistumisesta. Näiden välyksien katoamisen jälkeen tangon liike on enää noin 0,5 mm kumpaankin suuntaan junan yliajon aikana, joka on käytännössä vain tangon luonnollista värähtelyä.

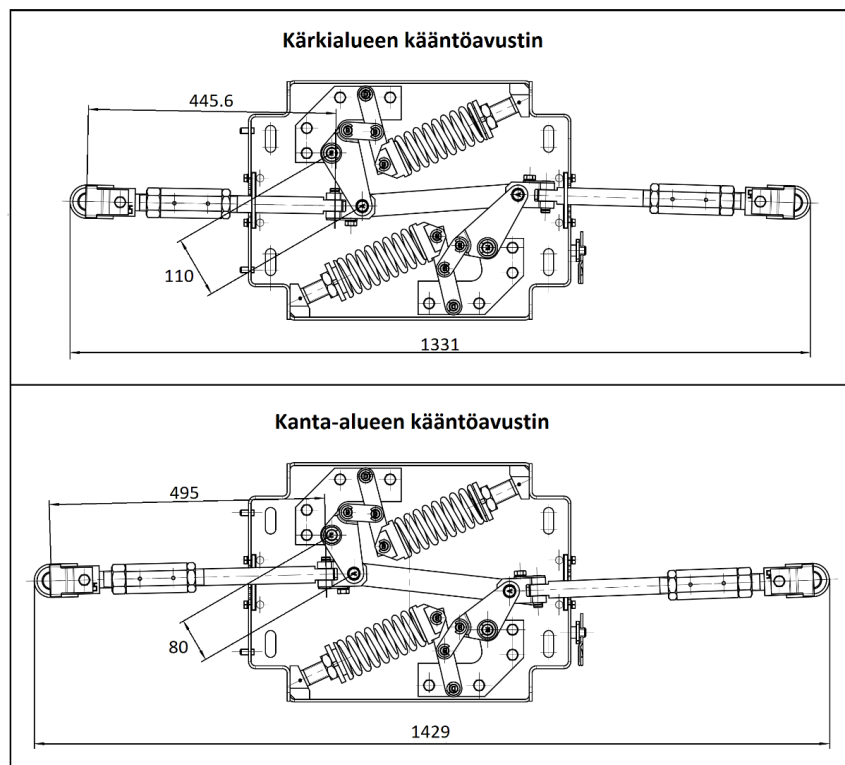
Vaihteenkääntölaitteiden kohdalla nämä tarkastustangot ovat pitkissä 1:15,5-vaihteissa säädetty Väyläviraston RATO 14:n (Liikennevirasto 2016) mukaisesti antamaan virhesignaalin, jos tarkastustangon liike ylittää hetkellisestikin 4 mm rajan. Tarkastustankojen liike vaihteenkääntölaitteen kohdalla oli taajuudeltaan ja käyrän muodoltaan hyvin samanlaista kuin kuvassa 69, mutta liikkeen amplitudi kuitenkin vain murto-osan tästä. Kääntölaitteiden kohdalla tangot



liikkuivat kuormituksen aikana vain noin 0,2–0,5 mm. Kyseisessä tilanteessa niin sanottu aukiajo ei ole siis vielä lähellä. Alueen kunnossapitäjä on kuitenkin raportoinut, että varsinkin koevaihteessa V330 on havaittu useita aukiajoja, jotka johtuvat juuri näiden tarkastustankojen liiallisesta liikkeestä kuormituksen aikana. Valitettavasti nämä kyseiset siirtymäanturit olivat asennettuna pelkäästään vaihteeseen V331, joten toisen vaihteen tankojen liikettä ei pystytty havainnoimaan. Vaihteet ovat kuitenkin vaihteenkääntölaitteiden kohdalta täysin identtiset, joten nämä toisesta koevaihteesta saadut aukiajosignaalit kertovat selkeästi joistakin tunnistamattomista ongelmista näiden kummankin vaihteen rakenteessa tai säädöissä.

Kääntöavustimen kohdalla kuvan 69 mukaiset hieman suuremmatkaan värähtelyt eivät itseasiassa saa aikaan aukiajoja, sillä tältä kohdalta valvontatangot on säädetty ilmaisemaan vasta 9 mm suuruiset poikkeavat liikkeet tangossa. Näin suuria valvontatankojen liikkeitä ei kuitenkaan käytännössä koskaan pysty muodostumaan, joten ne eivät todellisuudessa valvo kielen asemaa kääntöavustimen kohdalla. Tämän valvonta-arvon pienentämistä tulisi ehdottomasti tulevaisuudessa pohtia, jotta valvontalaitteet saadaan aktiivisesti käyttöön myös kääntöavustimen kohdalla.

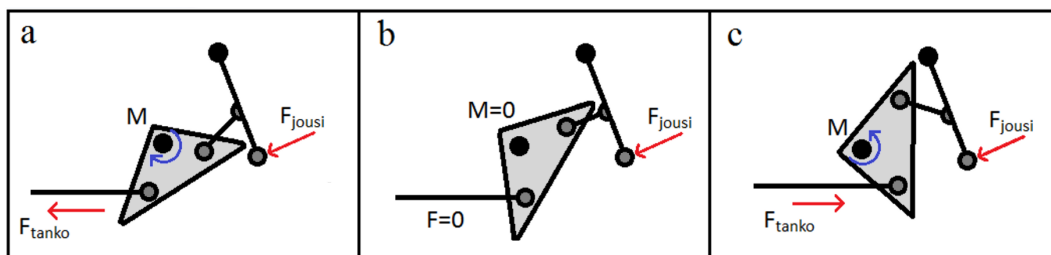
Nämä testit tehtiin siis kaikki vaihteen kärkialueella olevalla 110 mm iskupituudella olevalle kääntöavustimelle ja ne osoittivat laitteen sopivat erinomaisesti käyttötarkoitukseensa. Laitteesta suunniteltiin kuitenkin myös lyhyemmällä 65 mm iskupituudella oleva laite vaihteen kielen kantaosan kääntämiseen. Kyseinen mekanismi rakennettiin samaan laiterunkoon modifioimalla jousen esipuristuspuutua, pidentämällä kääntötankoja ja muuttamalla jousimekanismin kolmiokappaleen dimensioita oheisen kuvan 70 mukaisesti.



Kuva 70. Vaihteessa V331 käytettyjen kääntöavustimien rakenne-erot vaihteen kielen kärki- ja kanta-alueella.

Näiden rakenteiden ajateltiin alustavasti toimivan ihan yhtä tehokkaasti omalla iskupituudellaan. Vaihteen V331 asennuksen jälkeisenä syksynä 2016 kuitenkin huomattiin, että vaihteen kanta-alueen kääntämisessä ilmenee ongelmia. Kanta-alueen kääntöavustin ei päässyt kääntöliikkeensä loppuun, joka vaikutti suoraan myös kääntölaitteeseen B, jonka kääntösekvenssi jäi myös kesken. Vaihteen asennushetkellä vaihteen käännöt olivat luonnollisesti testattu ja vaihde oli kääntynyt normaalisti asennosta toiseen, kuten myös loppukesän ja alkusyksyn aikana. Ulkolämpötilan laskettua 0 °C kohdalle kääntöavustimen jousimekanismissa havaittiin kuitenkin selkeästi vikaa.

Kuvassa 70 esitetty jousimekanismin kolmiokappale on siis tässä vikaantuneessa kantalaitteessa vain 80 mm pituinen, jolloin laite kykenee mekanismin kääntyessä lyhyempään iskupituuteen. Kärkialueen laite kykenee laboratoriotestien mukaan omalla 110 mm kolmiokappaleellaan maksimissaan noin 120 mm iskupituuteen, joten lyhyemmän laitteen iskupituus on tällä samalla suhteella noin 87 mm. Laitteen tuottama voimakäyrä ei kuitenkaan ole suhteessa saman muotoinen kuin kärkilaitteella, koska mekanismeja yhdistävä hahlotanko on täysin samanlainen kummassakin laitteessa. Hahlotangon ollessa identtinen, avoimen puolen jousimekanismi liikkuu kääntösekvenssin alussa saman 35 mm yksinään, ennen kuin toinen jousi lähtee mukaan liikkeeseen. Tämän yksinäisen liikkeen aikana ensimmäinen jousimekanismi on kuitenkin pienemmän kolmiokappaleensa takia ehtinyt jo melkein puoleen väliin 87 mm pituista liikettään. Liikkeensä puolivälin alueella tämä jousimekanismi ei pysty tuottamaan juuri lainkaan voimaa, koska jousen ja kolmiokappaleen välissä oleva tanko on samassa linjassa kolmiokappaleen kiinnityspisteen kanssa kuvan 71 kohdan b mukaisesti. Toinen jousimekanismi lähtee siis liikkeelle ainoastaan vaihteenkääntölaitteen kieleen kohdistaman taivutusmomentin johdosta.



Kuva 71. Uuden kääntöavustimen jousimekanismin toimintaperiaate.

Vaihteenkääntölaitteen luoman voiman johdosta kääntöavustimen mekanismi liikkuu vielä hieman pidemmälle tämän pisteen yli. Käännön edetessä kohti päätepistettään ja kielen suoristuessa vaihteenkääntölaitteen synnyttämä taivutusmomentti alkaa kuitenkin koko ajan pienetä kielissä. Tässä vaiheessa kääntöä jousimekanismin josten tulisi olla jo siinä asemassa, että niiden voima on liikettä avustava ja riittää viemään kielten kääntöliike pääteasemaan kummallakin puolella. Etummainen jousimekanismi on kuitenkin vasta juuri päässyt keskiasemansa yli ja pitkän hahlotangon takia takimmainen jousi on itseasiassa vasta lähestymässä keskiasemaansa ja vastustaa vielä liikettä. Laite saavuttaa siis niin sanotun voimattoman keskitilansa vasta aivan käännön loppuvaiheilla. Tämän kohdan ylittämiseen tarvittaisiin siis vielä vaihteenkääntölaitteelta tulevaa ulkoista voimaa, mutta tämä voima ei ole enää kovin iso, sillä suljettuun asemaan kääntyvä kieli on tässä kohdassa jo saavuttanut pääteasemansa vaihteenkääntölaitteen kohdalla ja taivutusmomenttia ei enää synny lisää. Lämpimissä oloissa kummatkin kielet ovat kuitenkin hyvin notkeita ja tämän kohdan yli päästään vielä kohtalaisen pienillä voimilla, jotka

vaihteenkääntölaite pystyy tuottamaan aukaistavaan kieleen vielä ihan kääntö-tapahtuman loppupuolellakin. Kylmissä oloissa kielet kuitenkin jäykistyvät ja taivutusvastus niissä lisääntyy, jolloin vaihteenkääntölaitteen voimat eivät enää riitä käännön loppupuolella koko vaihteen kannan liikuttamiseen. Tällöin vaihteen kääntö jää kesken kanta-alueella.

Kääntöavustimen voimatasot ovat siis toisin sanoen pienimmillään juuri silloin, kun vaihteen kantaosa tarvitsisi eniten avustusta kääntymiseen. Tämä johtuu suoraan hahlotangon väärästä pituudesta, jonka vuoksi jälkimmäinen jousi muuttuu vasta liian myöhään liikettä avustavaksi. Lyhyemmällä hahlolla jälkimmäinen jousimekanismi saavuttaisi keskiasemansa aiemmin ja voimaton alue ylitettäisiin vaihteenkääntölaitteelta tulevien voimien avulla, kuten kärkialueen laitteessa.

Jotta vaihde saatiin takaisin toimintakuntoiseksi, vaihteen kunnossapitäjä pienensi hahloa hitsin avulla. Vaihde toimi tämän jälkeen hieman paremmin, mutta vaihteen kääntö oli siltikin vielä hyvin verkkaista vaihteen kanta-alueella. Lopulta kunnossapitäjä kokeili hitsata hahlon kokonaan umpeen, jolloin kielten väliin muodostui käytännössä kiinteä tanko ja alkuperäinen idea eriaikaisesta käännöstä poistettiin. Tämä versio toimi kaikista parhaiten, joka osoittaa sen, että vaihteenkääntölaitteiden eriaikaisesta liikkeestä huolimatta vaihteen kanta kääntyy parhaiten käyttämällä täysin jäykkää tankoa kielten välissä.

Tämän havainto tarkoittaa käytännössä siis sitä, että tällaisten pitkien elastisten vaihteen kannassa voidaan käyttää aivan normaalia Railex-kääntö-avustinta tai Schwihagin lyhyisiin vaihteisiin suunnittelemaa kiinteätankoista kääntöavustinta, jonka ominaisuuksista on kerrottu tarkemmin Kouvolan elastisista vaihteista kertovan raportin yhteydessä (Varis & Luomala 2017).

Toisen koevaihteen V330 kääntöavustimina käytettiin luvussa 2.2.1 esiteltyä jousivippeä, jonka kärkikääntöavustinta modifioitiin pidemmän iskun saamiseksi pidemmällä ja jäykemmällä jousella. Laitteen jousikotelon rajallisten ulkomittojen takia mekanismiin ei kuitenkaan saatu asennettua aivan niin pitkää joustaa, kuin iskupituus olisi optimissaan vaatinut, joten kärkilaitteen tuottamat voimatasot käytön aikana jäivät haluttua pienemmiksi. Tämä oli varmasti yksi merkittävä osasy sille, miksi myös tässä vaihteessa on ollut kääntöongelmia vaihteen asennuksen jälkeen. Nämä kääntöavustimet ovat aiheuttaneet vaihteeseen myös paljon eristysvikoja, jotka johtuivat siitä, että avustimien kääntötangot eivät ole olleet ihan kohtisuorassa linjassa käännettävien kielten kanssa, jolloin kääntötanko pääsee ottamaan herkemmin kontaktia vaihteen muihin osiin aiheuttaen oikosulun vaihteen virtapiirissä.

Ongelmien ratkaisemiseksi kummankin vaihteen kanta-alueen kääntöavustimet vaihdettiin Schwihagin kiinteätankoiseen versioon. Vaihteessa V331 vaihdos tehtiin aiemmin joulukuussa 2017 ja tästä saatujen kokemusten pohjalta lopulta myös vaihteessa V331 vuoden 2018 aikana. Heikon jousivoimansa takia myös vaihteen V330 kärkikääntöavustin tulisi kenties tulevaisuudessa vaihtaa vaihteessa V331 käytettyyn malliin.

## 4.7 Muut havainnot koevaihteissa

Yleisenä havaintona näistä koevaihteista voidaan todeta se, että ne aiheuttivat yllättävän paljon ennestään tunnistamattomia ongelmia, jotka liittyivät monet siihen, että vaihteen alkuperäinen asennus selkeästi epäonnistui. Vaihteen eivät olleet täysin toimintakuntoisia työmaalle tullessaan, joka vaikutti siihen, että osa vaihteen toiminnan kannalta tärkeistä säädöistä jouduttiin tekemään varsinaisen vaihteen asennuksen jälkeen rataoloissa. Vaihteen kokoonpanotehtaalla sattuneiden asennusepäselvyyksien johdosta kaikki kaukalopölkkyt olivat kielisovituselementissä hieman väärässä kohdassa, joka johti siihen, että vaihteen kääntötangot ja tarkastustangot eivät kulkeneet pölkyn keskilinjalla, kuten oli suunnitelmissa tarkoitus. Nämä pölkkyjen orientaatio-ongelmat aiheuttivat asennuksen jälkeen tankojen törmäämistä kaukalopölkyn reunoihin, jonka takia kummankin vaihteen pölkkytystä ja kääntölaitteiden kiinnityksiä jouduttiin modifioimaan vielä liikenteen alaisena. Täysin suunnitelman mukaiseksi pölkkyjen asemaa ei kuitenkaan pystytty enää rataoloissa saamaan, joten vaihteet ovat kärsineet näistä toimilaitepölkkyjen orientaatio-ongelmista koko tähänastisen elinkaarensa ajan. Pölkkyjen orientaatio-ongelmien seuraukset kääntöavustintankojen asemaan on nähtävissä kuvasta 72. Tangot ovat selkeästi vinossa suhteessa raiteen kohtisuoraan linjaan nähden, jolloin ne eivät pysty tuottamaan vaihteen kieliin täyttä suunniteltua kääntövoimaa.

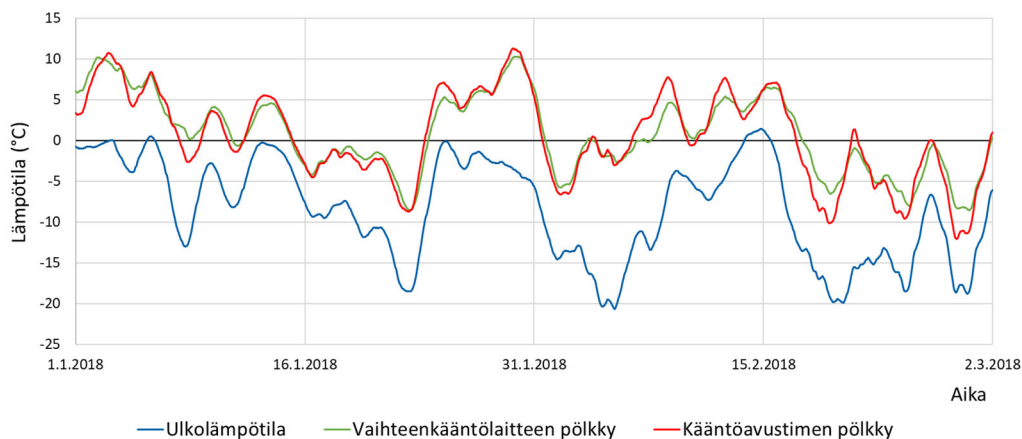


Kuva 72. *Kaukalopölkyn väärästä asemasta johtuva kantakääntöavustimen kääntötankojen vinous vaihteessa V331.*

Toinen koevaihteisiin liittyvä toiminnallinen havainto oli vaihteen lämmityksen ongelmat. Suunnitelmatasolla kaikkien kaukalopölkkyjen pohjaan oli tarkoitus asentaa lämmityselementtilevy, joilla varmistetaan kääntötankojen riittävä toimintakyky myös kylmissä talviolosuhteissa. Kokoonpanovaiheen kireän aikataulun vuoksi lämmityselementtejä ei kuitenkaan ehditty asentamaan pölkyn pohjalle vielä kokoonpanovaiheessa, joten niidenkin asentaminen jäi vaihteen käyttöönoton jälkeiseksi työksi. Koevaihteissa käytettävän uuden pölkkyjaon vuoksi myös lämmityselementtien kytkentärasia ja sen kiinnitys piti suunnitella uudelleen, johon ei suunnitelmissa osattu varautua laisinkaan. Tästä syystä tämäkin jäi radalla tehtäväksi jälkityöksi. Valmiissa vaihteessa pölkkyssä kuitenkin on jo kääntötangosto asennettuna, joten lämmityselementtien asennus pölkyn pohjaan olisi vaatinut koko kääntömekanismin purkamista ja uudelleen asentamista. Pienillä lämmityslevyn modifikaatioilla elementit saatiin

asennettua pölkyn pohjaan, mutta se oli huomattavasti alkuperäistä suunnitelmaa hankalampaa.

Lämmityslevyt puuttuivat siis kohtalaisen pitkään vaihteista, jolloin myös kaukalopölkkyjen sisälämpötilan mittaukset eivät olleet kovinkaan relevantteja. Lämmityslevyjen asentamisen jälkeen tilanne ei juurikaan parantunut, sillä kääntöavustimien kohdalle pölkkyihin ei asennettu missään kohtaa kunnollisia kansirakenteita. Pölkkyt ovat päältä avonaisia, kuten esimerkiksi kuvista 4 ja 72 voidaan havaita. Vaihteenkääntölaitteiden kohdalla pölkkyissä oli hieman paremmat suojukset (katso kuva 8), mutta tällä ei ole ollut juuri lainkaan vaikutusta pölkkyjen lämpötiloihin, jotka on esitetty kuvassa 73 ajanjaksolla 1.1.2018–2.3.2018.



Kuva 73. Kaukalopölkkyjen sisältä mitatun lämpötilan vertailu ulkolämpötilaan ajanjaksolla 1.1.2019–2.3.2019 vaihteessa V331.

Kuvasta 73 voidaan havaita, että lämmityksellä on ollut keskimäärin noin 5–10 °C positiivinen vaikutus kummankin pölkyn sisälämpötilaan. Kylmimmillä yli -10 °C pakkaskeleillä lämpötila on siis laskenut negatiivisen puolelle myös pölkyn sisällä, joka mahdollistaisi lumen kertymisen pölkkyyn. Tästä voidaan vetää suora johtopäätös, että lämmitys ei ole ollut riittävällä tasolla. Pölkyn sisällä vallitsevaan lämpötilaan saataisiin varmasti kohennusta pölkkyjen kansia parantamalla, mutta todennäköisesti sulan puolella pysyminen vaatisi myös suuremmat lämpövastukset.

Kaukalopölkkyjen tuennan jälkeen kunnossapitäjä havaitsi myös, että pölkkyjen tuennan jälkeinen pysyvyys on todella heikkoa ja sepeli ikään kuin pakenee kaukalopölkyn alta tuennan jälkeen. Kunnossapitäjä näki ongelman johtuvan siitä, että kaukalopölkyn alle ei oltu kokoonpanovaiheessa asennettu lainkaan pohjaimia, kuten vaihteiden betonipölkkyihin. Tästä syystä kunnossapitäjä päätti jälkiasennuttaa kaukalopölkkyihin pohjainratkaisun. Pohjain kiinnitettiin liimalla erilliseen metallilevyyn, joka tämän jälkeen pultattiin kiinni pölkyn pohjaan. Tämä paransi kaukalopölkkyjen tuennan jälkeistä pysyvyyttä, joten asennuksen voidaan katsoa onnistuneen. Tulevaisuudessa kaukalopölkkyihin tulee siis aina asentaa pohjaimet jo kokoonpanovaiheessa raidegeometrian pysyvyyden varmistamiseksi.

## 5 Päätelmät ja jatkotutkimustarpeet

Tämä raportti käsitteli Oulun Nokelaan asennettujen elastisten 1:15,5-koevaihteiden rakenteellisia muutoksia ja niiden käyttäytymistä junakuormitusten alaisena. Projektin aikana tehtiin useita tärkeitä havaintoja vaihteiden rakenneerojen vaikutuksista, joista oleelliset on koottu tähän lukuun.

Useat eri vaihteissa suoritettavat mittaukset osoittivat selkeästi, että rakenteeseen lisätyt elastiset levyt parantavat vaihteen pystysuuntaista käyttäytymistä. Ratarakenteen pysyvä painuma on ollut kummassakin vaihteessa koko seurantajakson aikana hyvin maltillista ja viimeisen tuennan jäljiltä pysyvä painuma on ollut käytännössä olematonta vuoden 2018 alusta lähtien. Tämä on hyvinkin merkittävä parannus, sillä vaihderakenteet ovat normaalisti epä-jatkuvuuskohtien ja erikoiskomponenttien takia erityisen hankalia kohtia raidegeometrian pysyvyyden kannalta.

Radan palautuva painuma pysyy vaihteiden suoralla reitillä varsin tasaisena (kuva 25) ja suuria muutoksia ei pääse ajankaan suhteen syntymään. Tästä palautuvan painuman tasaisuudesta kertoo hyvin myös erittäin pienet palautuvan painuman varianssin arvot ( $\delta^2_{max} < 0,2 \text{ mm}^2$ ). Uusien kiskon ja pölkyn välissä olevien elastisten levyjen ansiosta akselikuormat myös jakautuvat huomattavasti tasaisemmin pölkylle ja niiden palautuvat painumat jäävät selkeästi pienemmiksi. Elastiset levyt tuovat tasaisuutta myös vuodenaikaisvaihteiluihin, sillä levy toimii tehokkaampana elastisuuden välittäjänä silloin kun sepelirakenne on jäässä. Tämä johtaa siihen, että elastisuus on kesällä ja talvella kiskon näkökulmasta kohtuullisen samanlaista.

Kaukalopölkkyjen joustokäyttäytyminen kuorman alla oli betonivaihepölkkyjä suurempaa, joka on sinänsä yllättävää, sillä ne ovat ulkomitoiltaan suurempia. Tätä selittää kuitenkin se, että näiden kaukalopölkkyjen kohdalla pölkkyvälit jäivät kokoonpanovaiheessa todella kapeiksi, jolloin tukemiskoneen hakkuja ei pystytty painamaan maahan optimaalisella kulmalla ja puristusliikkeen iskun pituudella. Tukemiskoneen henkilökunnalla ei myöskään luonnollisesti ole kertynyt vielä laajaa kokemusta siitä, mitkä parametrin arvot olisivat yleensäkin edes optimaaliset tällaisten pölkkyjen tuentaan. Nämä syyt ovat johtaneet siihen, että kaukalopölkkyjen alla oleva sepeli ei ole yhtä hyvin tiivistynyttä kuin normaalien betonipölkkyjen alla.

Risteysalueella rakenteen palautuva painuma on hyvin pientä, eli risteyskärki on varsin jäykkä kokonaisuus, eikä pölkkyjen allakaan ole kovin paljon tyhjää tilaa, kuten hankalasta tuentatilanteesta saattaisi alustavasti olettaa. Risteysalueen tukeutumisen kannalta on kuitenkin merkittävää, että mittauksissa pitkän risteyspölkyn suoran reitin pään havaittiin nousevan hieman ylöspäin junan ajaessa poikkeavaa reittiä. Pitkä vaihepölkky tukeutuu sepeliin siis aina useammasta pisteestä ja se saattaa saada aikaan myös pölkyn nousua. Tämä nousu korostuu entisestään, jos risteyskärjen alla olevan sepelin tuki heikkenee, jolloin jäljelle jäävien tukipisteiden jänneväli kasvaa hyvin suureksi ja taivutusmomentit kasvavat. Samoja havaintoja pystyttiin tekemään myös älypölkkyistä mitatuista taivutusmomenteista.



Hyvin pienestä pysyvästä painumasta huolimatta vaihteessa V330 havaittiin selkeitä poikkeavan raiteen kallistuspoikkeamia, jotka johtuvat vaihteen epäsymmetrisestä kuormituksesta ja ennen kaikkea pitkien vaihdepölkkyjen kuperuudesta. Näitä poikkeamia on kuitenkin hyvin vaikea poistaa rakenteesta, koska suuri osa pitkistä vaihdepölkkyistä ovat luontaisesti hieman kuperia.

Yksi merkittävimmistä havainnoista Oulun koevaihteissa oli kieli- ja kiskorakenteen vahva kulumisilmiö. Kummankin koevaihteen poikkeavan reitin kaarteiden ulkokisko kuluu merkittävää vauhtia (jopa 8 mm/vuosi), joka johtuu todennäköisesti vahvasta kaksipistekontaktista kiskon ja pyörän välillä. Samaa kulumisilmiötä havaittiin myös muissa alueen kaarteissa ja Kontiomäellä sijaitsevilla vastaavissa vaihteissa. Tämän kaksipistekontaktin katsotaan johtuvan itäisen yhdysliikenteen pellettijunien pyörien epäsuotuisasta kartiokkuudesta suhteessa Suomessa käytettyihin 60E1- ja 60E2- kiskoihin ihan koko junan käyttämällä rataosuudella. Mittaukset osoittivat lisäksi sen, että kulumisen ei ole suoraan verrannollista kaarresäteen pienenemiseen tai kallistuksen vajauksen arvoon, vaan kaksipistekontakti on voimakkainta 600-900 metrin kaarresäteillä olevissa kaarteissa. Näiden kaarteiden keskeiskiihtyvyydestä muodostuva poikittaisvoima riittää siis luultavasti viemään pyörän juuri kaksipistekontaktiin, mutta ei vielä puhtaaseen laippakontaktiin, jossa kulumisen olisi yksipistekontaktin paremman ohjautuvuuden ansiosta vähäisempää.

Eri vaihteiden kulumistuloksia analysoimalla saatiin tehtyä myös tärkeä havainto, että vaihteen asemoinnilla ja sen kautta liikenteen suunnalla vaihteessa on suuri merkitys kielisovitusalueen kielen sivukulumiseen. Oulun Nokelassa raskaat tavarajunat ajavat vaihteista aina kannasta kärkeen päin, kun taas Kontiomäellä raskasta liikennettä kulkee sekä kannasta kärkeen että kärjestä kantaan päin. Kielisovitus kuluu kärkialueeltaan huomattavasti nopeammin, jos raskaan akselipainon junat tulevat vaihteeseen kannan suunnasta, koska sivukulumista aiheuttava haitallinen laippakontakti syntyy jo väliskiskoalueella ja jatkuu koko kielisovitusalueen läpi. Kärjestä suunnasta tullessaan laippakontaktin muodostuminen alkaa vasta kielen kärkialueella, jolloin aivan kärjessä kulumista ei vielä muodostu, kuten kuvasta 49 voidaan havaita.

Uuden vaihderakenteen elastisuus tuo myös tiettyjä haasteita kulumisilmiöön. Pyörän ollessa laippakontaktissa, tukikisko painuu elastisten levyjen takia suhteessa vaihteen kieleen enemmän kuin nykyisen rakenteen mukaisessa vaihteessa. Tämä lisää kielen kulumista entisestään. Tukikiskon painumisongelma on kuitenkin jostain syystä havaittavissa vain laippakontaktin aikana ja ilman laippakontaktia kielen ja tukikiskon välinen korkeusasema on käytännössä muuttumaton sekä nykyisessä että uudessa vaihderakenteessa. Välilevyn tuoma elastisuus ei siis itsessään muodosta tukikiskon ja kielen välistä painumaongelmaa, mutta sillä on taipumusta lisätä sitä, jos pyörä joutuu laippakontaktiin ja näin ollen liian aikaiseen kontaktiin kielen kanssa.

Uuden kääntöavustimen testit osoittivat, että kärkialueelle asennettava laite kykenee suoriutumaan hyvin kääntötehtävästä ja sen voimat riittävät hyvin pitämään käytössä olevan kielen paikoillaan junan ylityksen aikana. Avoimen kielen pitovoima on laitteen erillisjousien takia hieman nykyistä Raillexia pienempi, mutta se ei ole ainakaan koevaihteessa aiheuttanut merkittäviä muutoksia avoimen kielen liikkeisiin.

Useiden positiivisten ominaisuuksien ohella uusissa koevaihteissa havaittiin myös monia ongelmia, kuten vaihteen kanta-alueen kääntöavustimen jumiutusta, kaukalopölkyn tukemisvaikeuksia ilman pohjainta sekä lämmityselementtien ja suojuksien asennusvaikeuksia. Suurin osa näistä erinäisistä asioista voidaan kuitenkin katsoa olevan prototyyppivaiheelle tyypillisiä ongelmia, eli ongelmia, joita syntyy tehtäessä asioista ensimmäistä kertaa. Useaan ongelmaan syynä oli siis selkeät suunnitelmavirheet tai informaatiokatkokset, joita pystyttiin kokemuksen karttuessa matkan varrella korjaamaan paremmiksi, jolloin ne eivät nouse ongelmaksi enää mahdollisen seuraavan tämän tyyppin vaihteen yhteydessä.

## 5.1 Suositukset jatkotoimille

Edellä esitettyjen päätelmien pohjalta heräsi tiettyjä jatkotutkimustarpeita sekä suosituksia jatkotoimien kannalta, joita on kerätty alle tiivistettyyn listaan:

1. Leveiden kaukalopölkkyjen tukemiseen liittyvää ammattitaitoa tulisi lisätä, jotta pystytään varmistamaan tuentatuloksen pysyvyys niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikajänteellä. Tämä tarkoittaa käytännössä riittävien pölkkyvälien varmistamista kaukalopölkyn kummallakin puolella sekä tukemishakkujen riittävän "aukeaman" säätämistä ennen tuentaa. Näillä toimilla pystytään varmistamaan, että tukemishakut saadaan työnnettyä riittävän syvälle pölkyn alle niiden kuitenkaan törmäämättä pölkyn reunoihin.
2. Pitkien vaihdepölkkyjen jatkuvan epäsymmetrisen kuormituksen takia tulisi jatkossa tutkia syvällisesti erilaisten tuentatapojen vaikutuksia pitkän pölkyn geometrian pysyvyyteen. Mitattujen tulosten pohjalta ehdotuksena voisi toimia pitkien pölkkyjen tukeminen myös suoran ja poikkeavan raiteen keskilinoilta, jolloin tukipisteitä olisi kaikissa tilanteissa enemmän ja pölkyn pohjapainejakauma saattaisi muodostua näin ollen huomattavasti tasaisemmaksi. Tämä auttaisi välttämään suuret taivutusmomentit, joita havaittiin suoraan risteyskärjen alla. Samalla tulisi tutkia myös pitkien pölkkyjen kuperuuden vaikutuksia vaihteen tuennalle. Vaihteen suoran raiteen kallistusta minimoitaessa pölkyn kuperuus muodostaa vääjäämättä kallistusta vaihteen poikkeavalle raiteelle. Tulevaisuudessa olisi siis kenties tarpeellista sallia tietty kallistus vaihteen poikkeavalla reitillä ja ottaa tämä huomioon myös radantarkastusmittauksia tehtäessä, jotta pölkyn kuperuuden tuomilta systemaattisilta virheiltä vältyttäisiin.
3. Pellettiä kuljettavien raskaiden tavarajunien reitillä olevan voimakkaan kaarrekulumisen syntyilmiöitä ja syitä tulisi jatkossa tutkia tarkemmin pyörä-kisko-kontaktin simuloinnin avulla. Tampereen yliopistolla on olemassa sekä suomalaisten että venäläisten vaunujen simulointimalleja ja pellettijunien todellisia pyöräprofiileja mitataan Vartiuksen mittausasemalla aktiivisesti, joten data simulointia varten on jo osittain olemassa. Simulointitapausten laajentamiseksi tulee kerätä vielä lisää dataa reitin kiskoprofiileista sekä reitillä kulkevista suomalaisista pyöristä.

4. Kielisovitusalueen kulumisen vähentämiseksi vaihteiden asemointia ja varsinkin liikennesuuntia vaihteiden yli tulisi miettiä jatkossa tarkemmin. Raskailla tavarajunilla tulisi välttää liikennettä vaihteen poikkeavan puolen kannasta kärkeen päin, sillä se lisää merkittävästi kielisovitusalueen kulumista.
5. Jatkossa pitkissä vaihteissa, jotka on varustettu vaihteenkääntölaitteen ulkoisella lukolla, tulisi käyttää ainoastaan tässä raportissa esitettyjä Schwihagin valmistamia kääntöavustimia tai niitä vastaavia rakenteita. Vaihteenkääntölaitteiden välisellä alueella kääntöavustimien pitää olla kaksijousisia mekanisme, jotka kykenevät liikuttamaan kieliä eriaikaisesti. Kielen kanta-alueen viimeisen kääntöavustimen tulee olla kiinteä yksijousinen mekanismi, jonka voimalla pystytään varmistamaan kannan kääntyminen.

## Lähteet

Bugarin, M. R. & Garcia Diaz-de-Villegas, J-M. 2002. Improvements in railway switches. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. pp. 275-286.

GOST 10791-2011. Interstate standard, all-rolled wheels. 2012. Federal Technical Regulation and Metrology Agency.

Kerokoski, O., Rantala, T., Köliö, A., Nurmikolu, A. 2013. Betonipölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Ratapölkyn mekaanisen toiminnan ja rapautumisen kokeellinen ja laskennallinen arviointi. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2013. 248 s. + liitt. 5 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2013-37\\_betoniratapolkyn\\_rakenteellinen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-37_betoniratapolkyn_rakenteellinen_web.pdf)

Korec. 2017. [WWW] [Viitattu 25.2.2019] Saatavilla:  
<https://www.korecgroup.com/sc-south-alliance-achieve-100-track-quality-trimble-gedo-vorsys/trimble-trimble-gedo-vorsys/>

Liikennevirasto. 2010. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2, Radan geometria. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 3/2010. 73 s. + liitt. 9 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo\\_2010-03\\_rato\\_2\\_radan\\_geometria\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2010-03_rato_2_radan_geometria_web.pdf)

Liikennevirasto. 2012. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 21, Liikkuva kalusto. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 21/2012. 37 s. + liitt. 25 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo\\_2012-21\\_rato\\_21\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2012-21_rato_21_web.pdf)

Liikennevirasto. 2014. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3, Radan rakenne. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 17/2014. 38 s. + liitt. 42 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2014-17\\_rato3\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2014-17_rato3_web.pdf)

Liikennevirasto. 2016. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 14, Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 14/2016. 28 s. + liitt. 20 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2016-14\\_rato14\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2016-14_rato14_web.pdf)

Liikennevirasto. 2018a. Ratatiedon extranet, Oulun raiteistokaavio. [WWW] [Viitattu 30.10.2018] Saatavilla: [https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk\\_n\\_extranet/raiteistokaaviot/alue\\_9\\_pohjanmaan\\_rata/](https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/raiteistokaaviot/alue_9_pohjanmaan_rata/)

Liikennevirasto. 2018b. Rautateiden verkkoselostus 2020. Helsinki. Liikenneviraston väylätietoja 2/2018. 72 s. + liitt. 142 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lv\\_2018-02\\_rautateiden\\_verkkoselostus\\_2020\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lv_2018-02_rautateiden_verkkoselostus_2020_web.pdf)

Loponen, T-R., Salmenperä, P., Nurmikolu, A. 2016. Liikkuvan kaluston ja raiteen välinen vuorovaikutus ja sen dynaaminen mallinnus. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 14/2016. 155 s. + liitt. 13 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2016-14\\_liikkuvan\\_kaluston\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-14_liikkuvan_kaluston_web.pdf)

Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T., Nurmikolu, A. 2015. Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015. 112 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2015-19\\_radan\\_kokonaisjaykkyyden\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-19_radan_kokonaisjaykkyyden_web.pdf)

Luomala, H., Rantala, T., Kolisoja, P., Mäkelä, E. 2017. Assessment of track quality using continuous track stiffness measurements. Georail 2017, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Railway Geotechnical Engineering. Marne La Vallee. pp. 281-290.

Kinugasa Y., Kigami S., Hayashi A. 2015. AIRJET-järjestelmän käyttö- ja huoltokäsikirja, Liikennevirasto. 29B1-AS21454-64E. Nabtesco.

Rantala, T., Kerokoski, O., Nurmikolu, A. 2013. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Kirjallisuusselvitys. Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013. 156 s. + liitt. 1 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2013-36\\_betoniratapolkyn\\_rakenteellinen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-36_betoniratapolkyn_rakenteellinen_web.pdf)

Ratahallintokeskus. 2005. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. Helsinki. 26 s.

Ratahallintokeskus. 2006a. Technical specifications for railway turnout. Helsinki. 244/731/06. 24 s.

Ratahallintokeskus. 2006b. Ratatekniset ohjeet ja määräykset (RAMO) osa 13, Radan tarkastus. Helsinki. 51 s. + liitt. 28 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rato\\_13\\_radan\\_tarkastus.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf4/rato_13_radan_tarkastus.pdf)

Salminen, E. 2013. Raideruuvivauriot lyhyissä vaihteissa. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2013. 81 s. + liitt. 9 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2013-32\\_raideruuvivauriot\\_lyhyissa\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2013-32_raideruuvivauriot_lyhyissa_web.pdf)

Varis, R. 2017. Vaihderakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 9/2017. 86 s. + liitt. 3 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2017-09\\_vaihterakenteiden\\_pystysuuntaiseen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-09_vaihterakenteiden_pystysuuntaiseen_web.pdf)

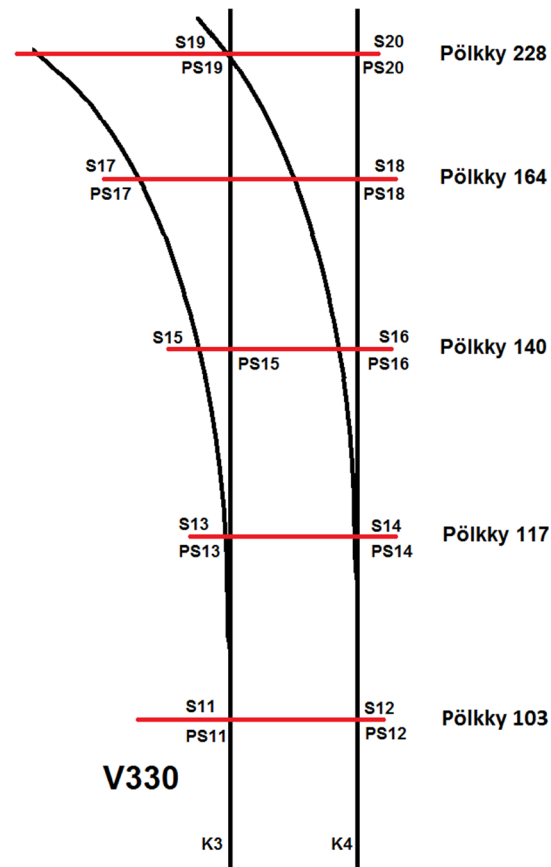
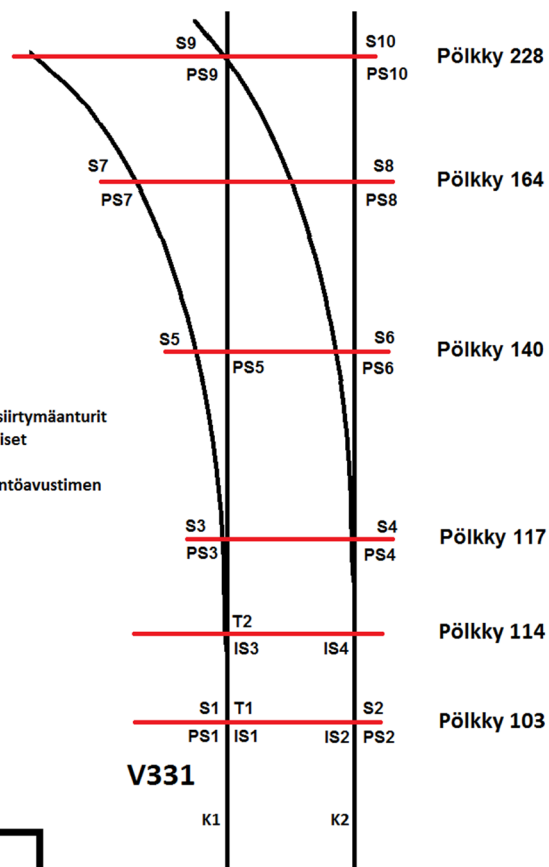
Varis, R., Luomala, H. 2017. Kouvolan elastisten vaihteiden monitorointi. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 54/2017. 54 s. + liitt. 1 s.  
[https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2017-54\\_kouvolan\\_elastisten\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2017-54_kouvolan_elastisten_web.pdf)

Varis, R. 2018. Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi. Helsinki, julkaistavana Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä-sarjassa. 46 s. + liitt. 2 s.

# Anturoidisuunnitelma

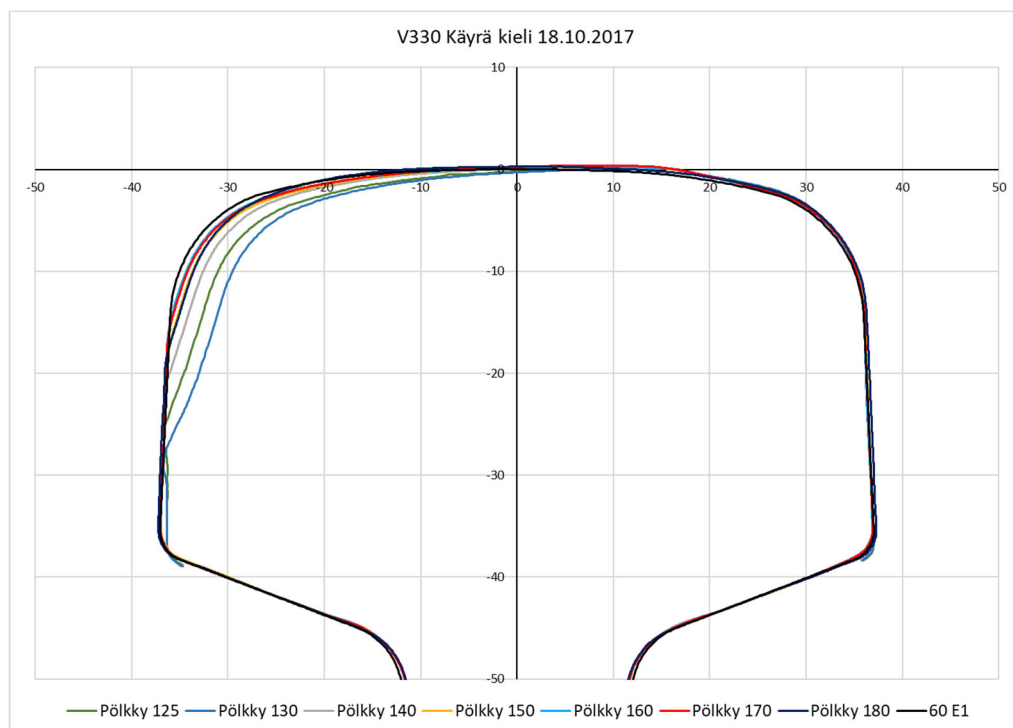
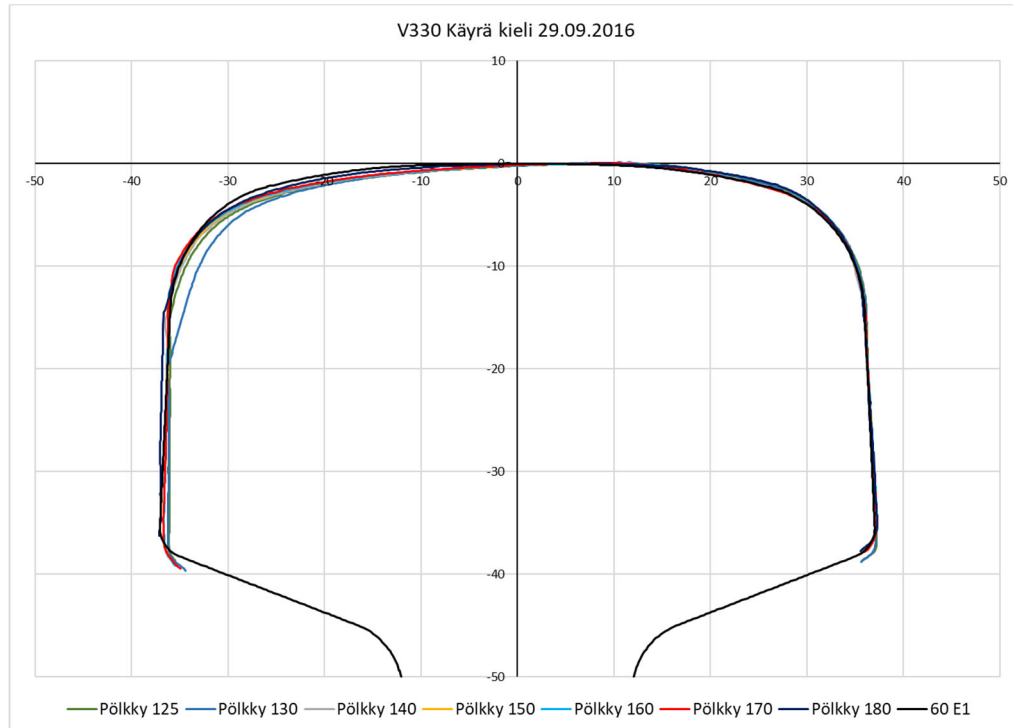
## Koekohteen anturoidinti:

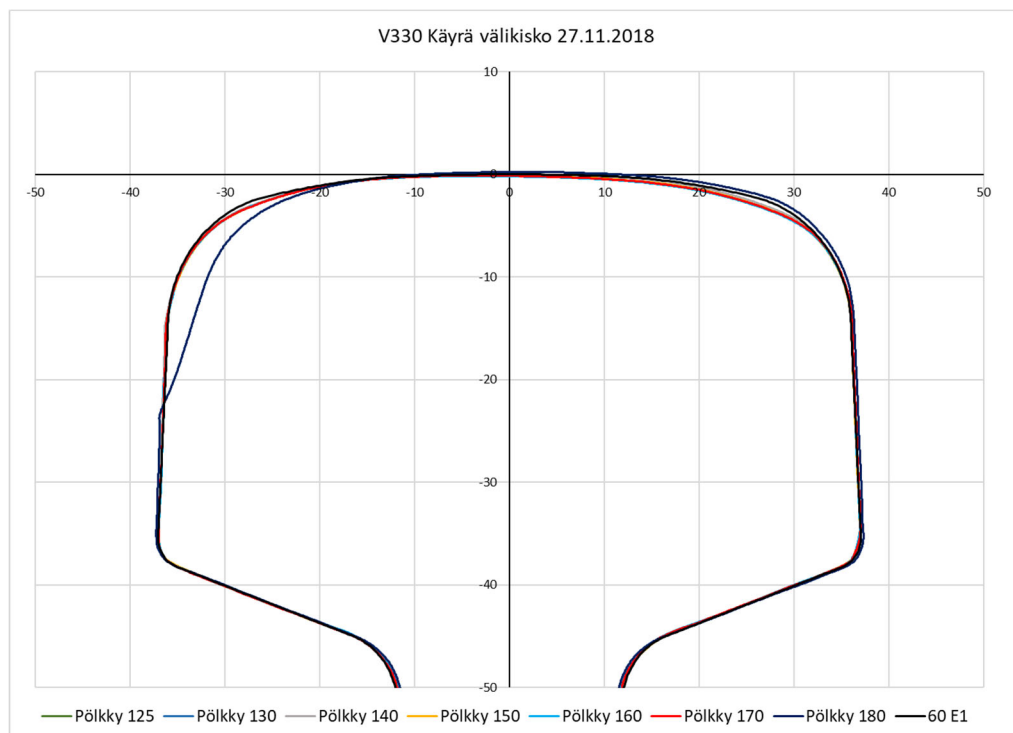
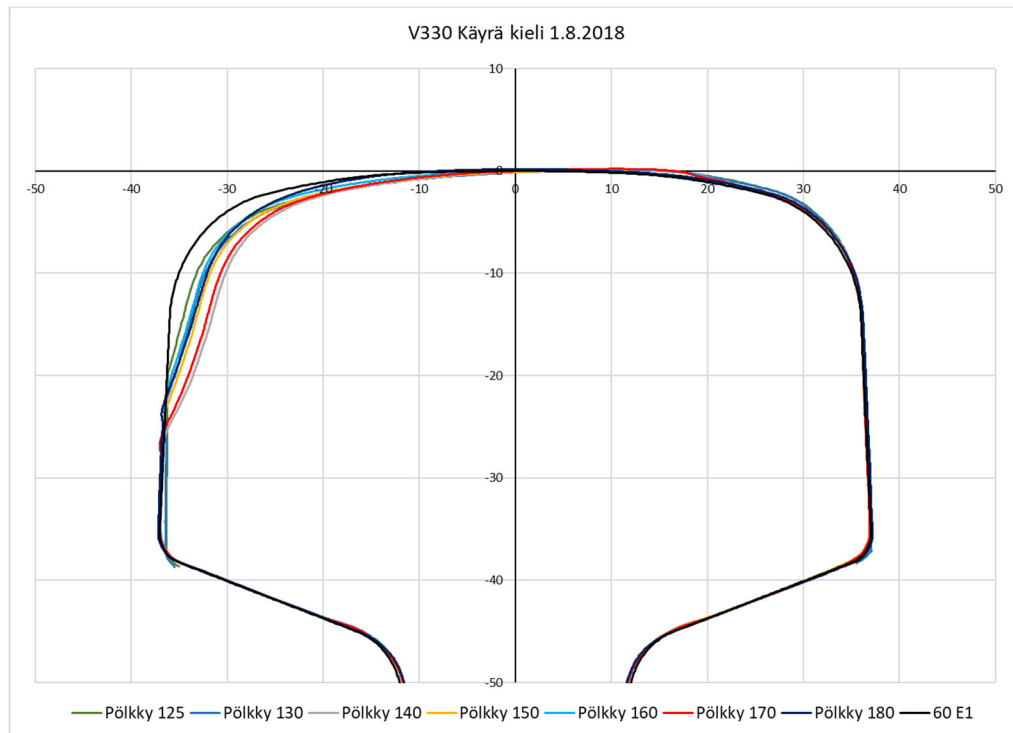
- S1 - S20** = Kiskon ja pölkyn väliset siirtymäanturit  
**PS1 - PS20** = Pölkyn ja pohjamaan väliset siirtymäanturit  
**IS1 - IS4** = Valvontatankojen ja kääntöavustimen tankojen siirtymäanturit  
**T1 - T3** = Lämpötila-anturit  
**K1 - K4** = Kiskon kuormitusanturit

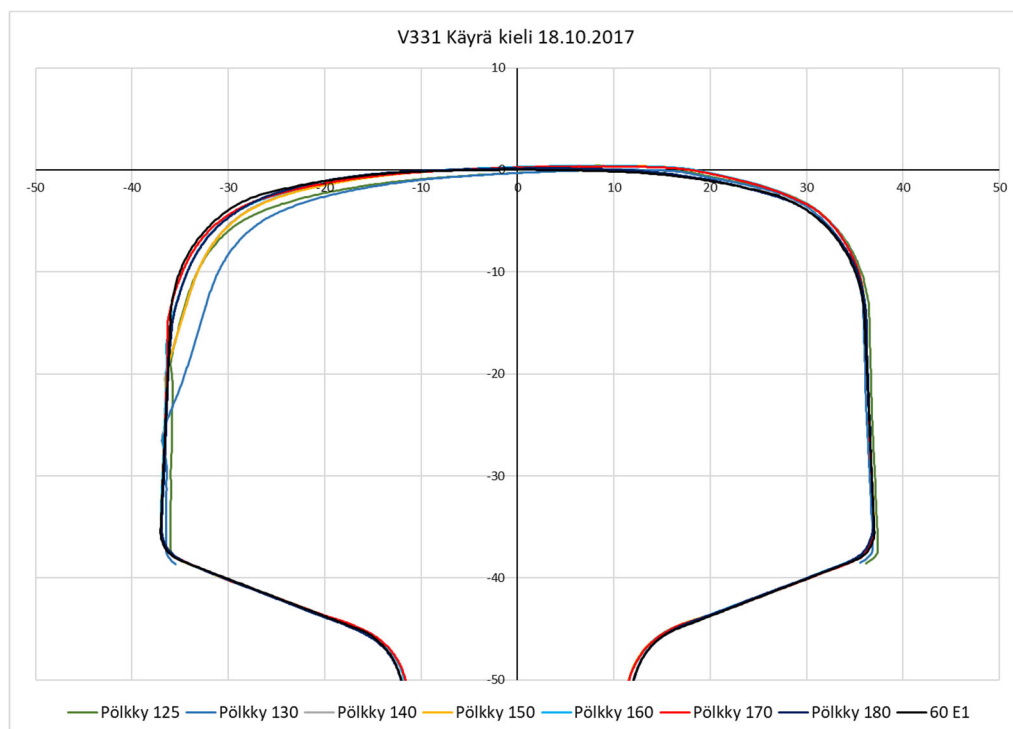
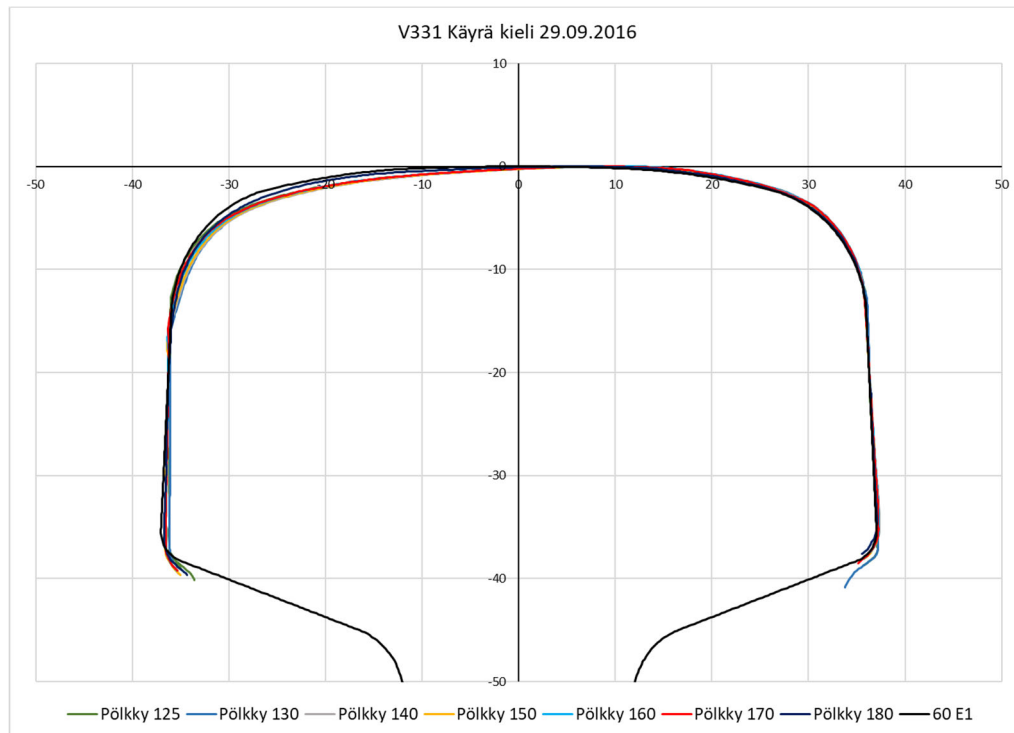


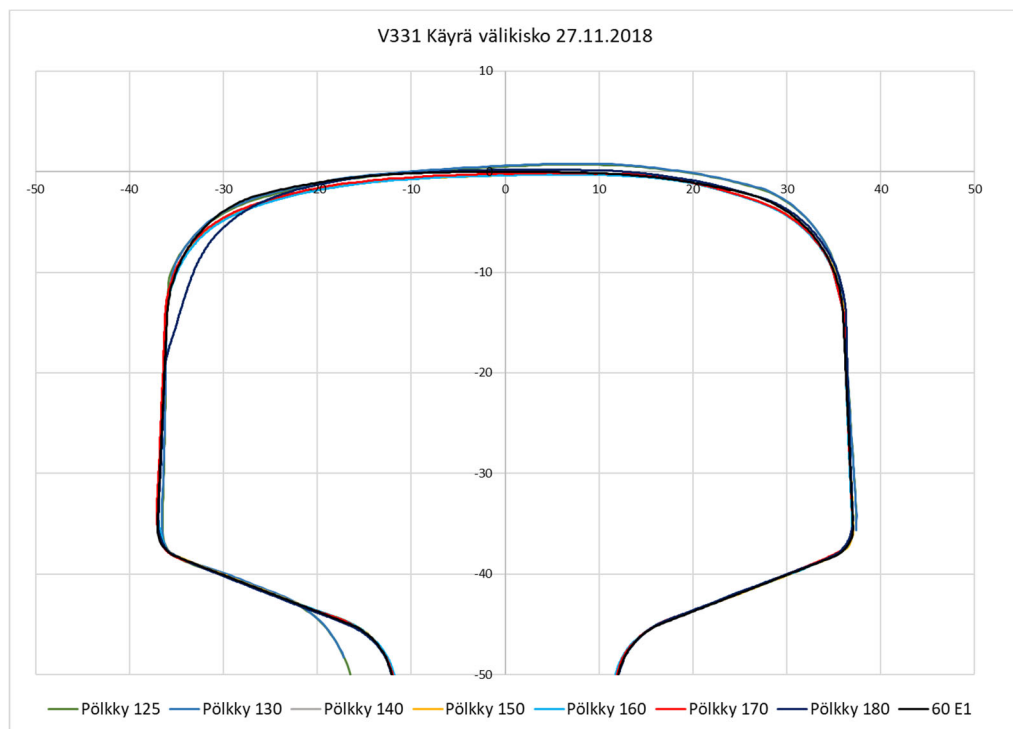
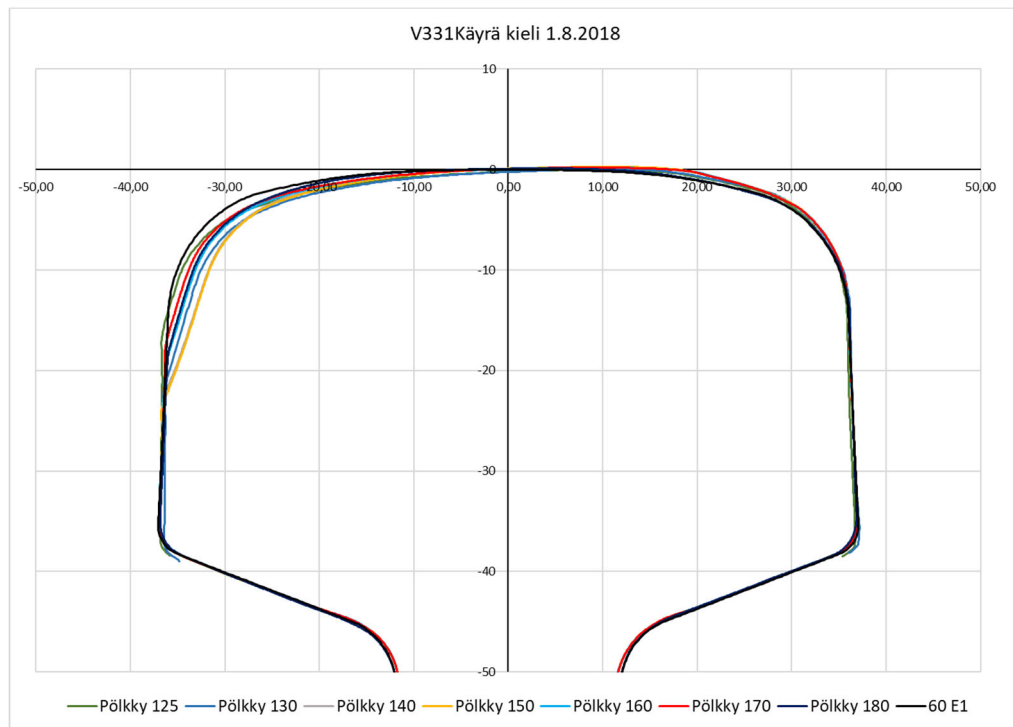


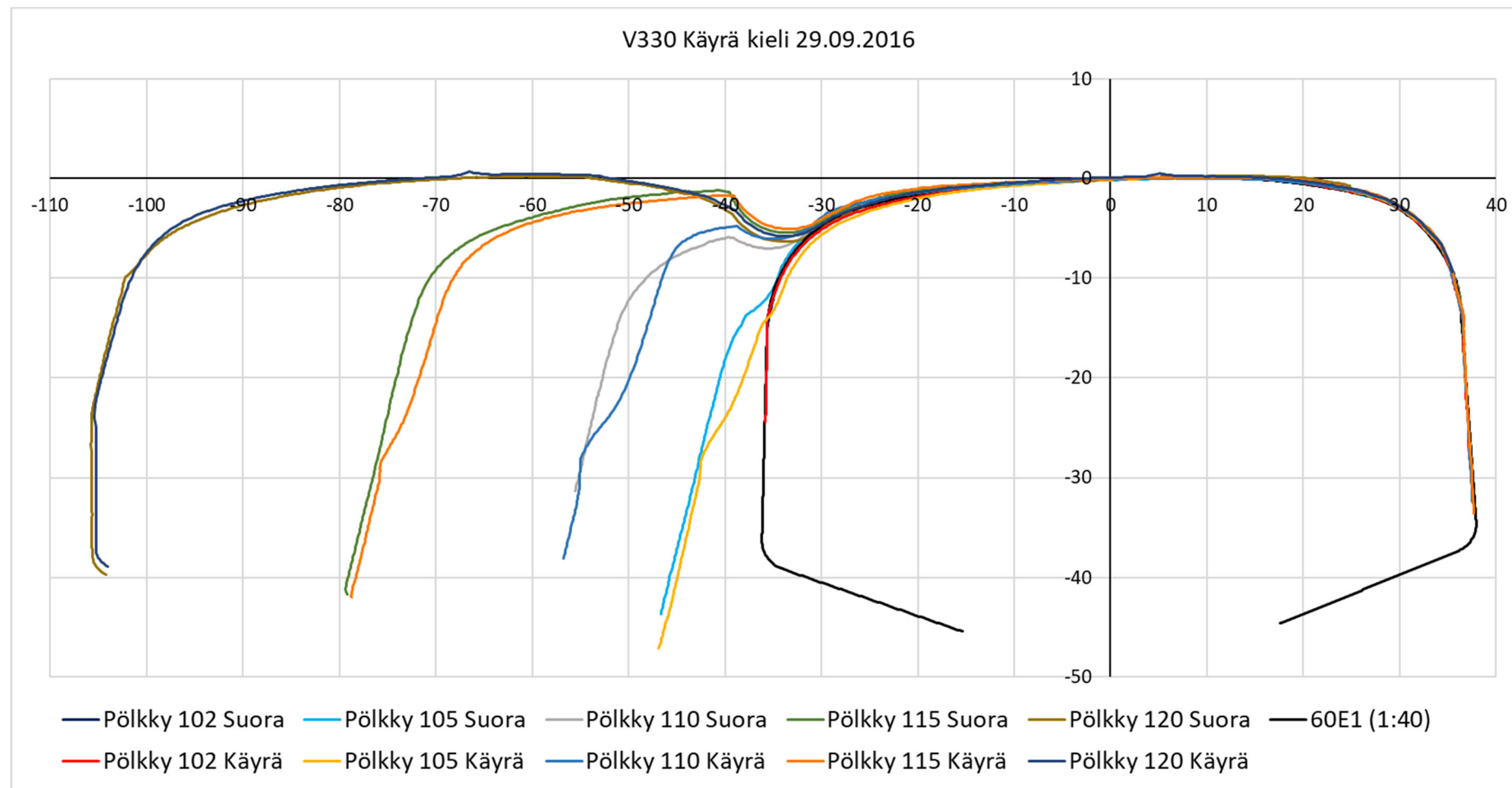
## Kulumismittauksen tulokset sekä välikisko- että kielialueelta kaikilta mittauskerroilta

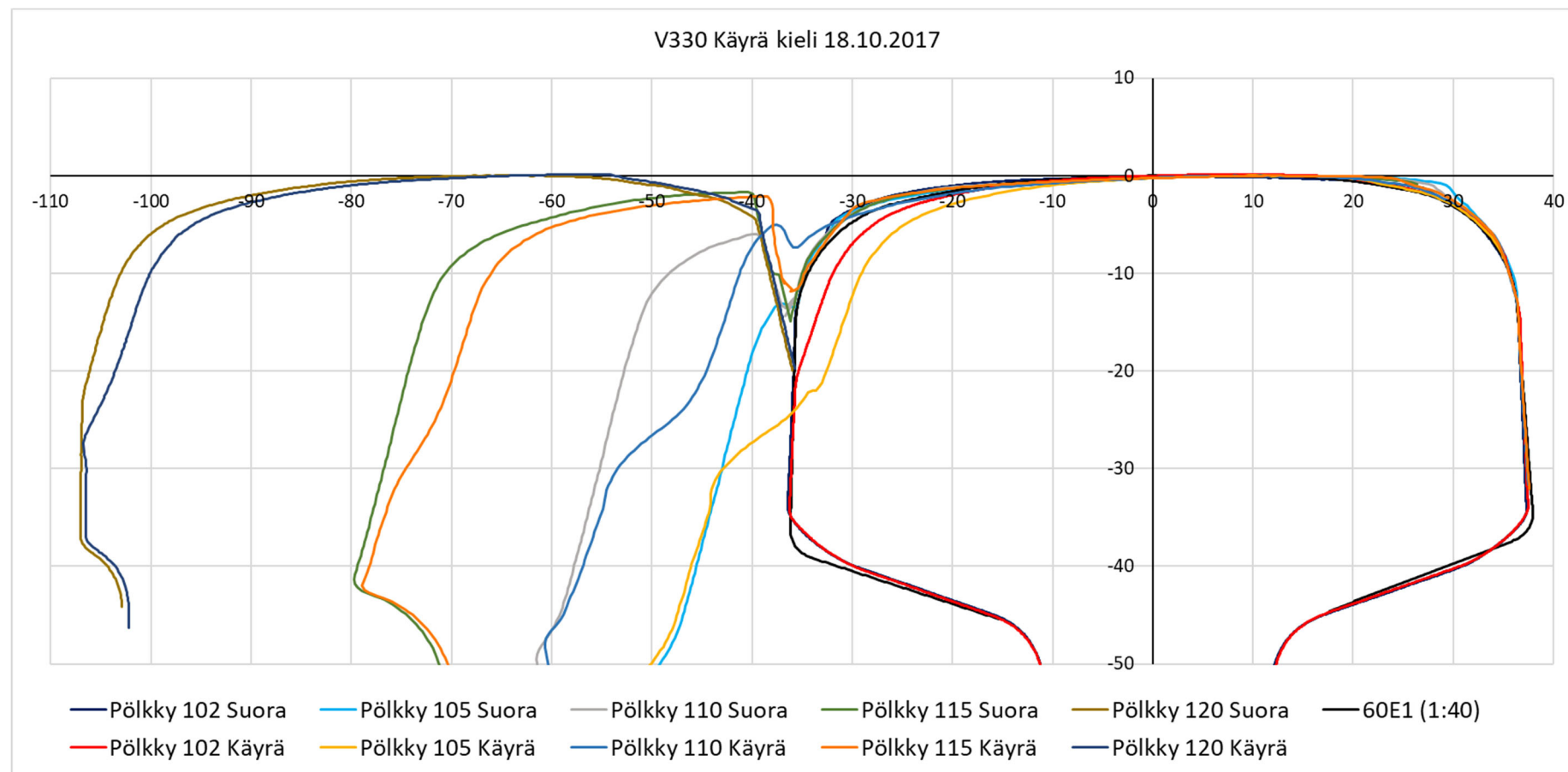




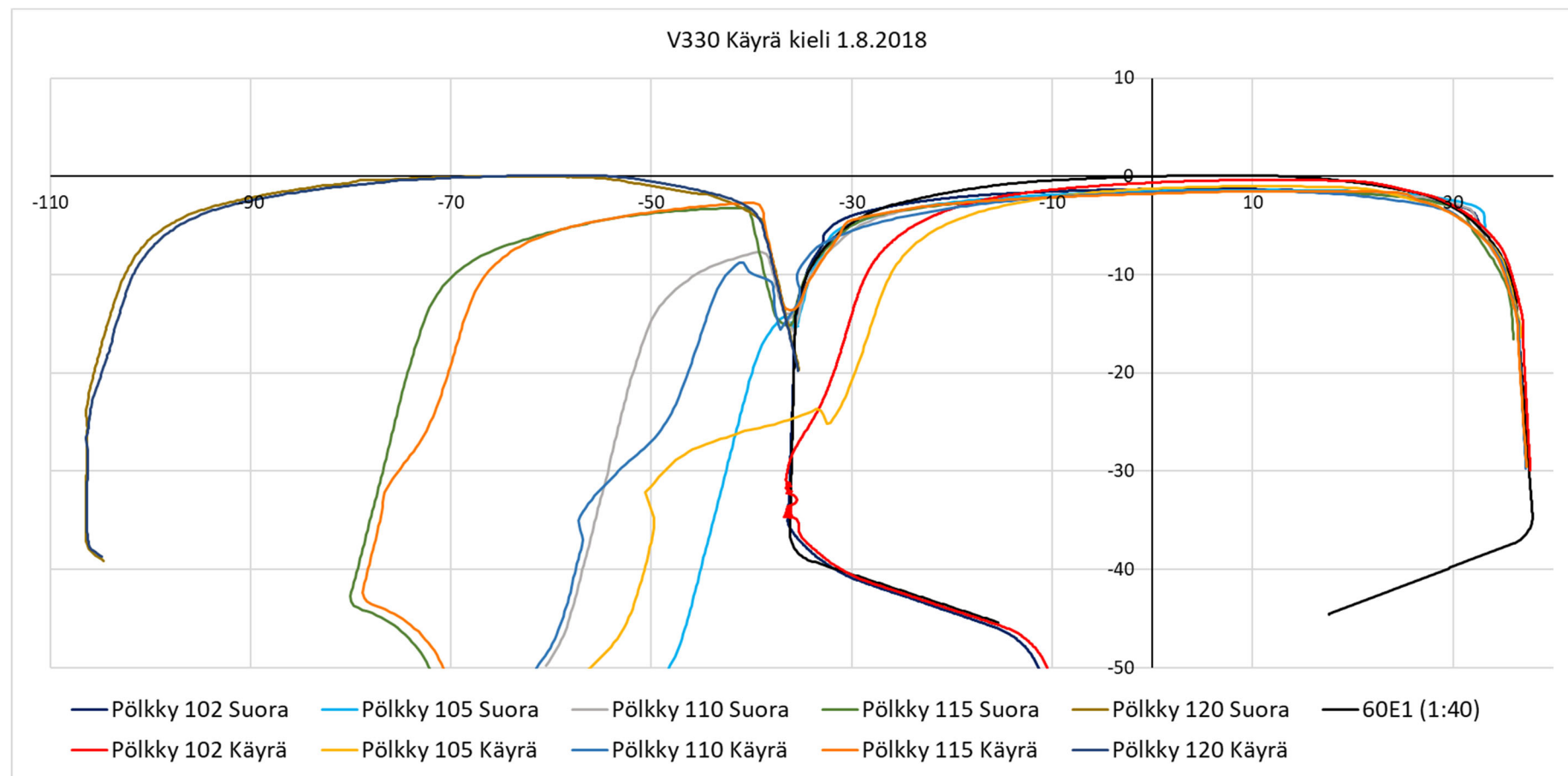


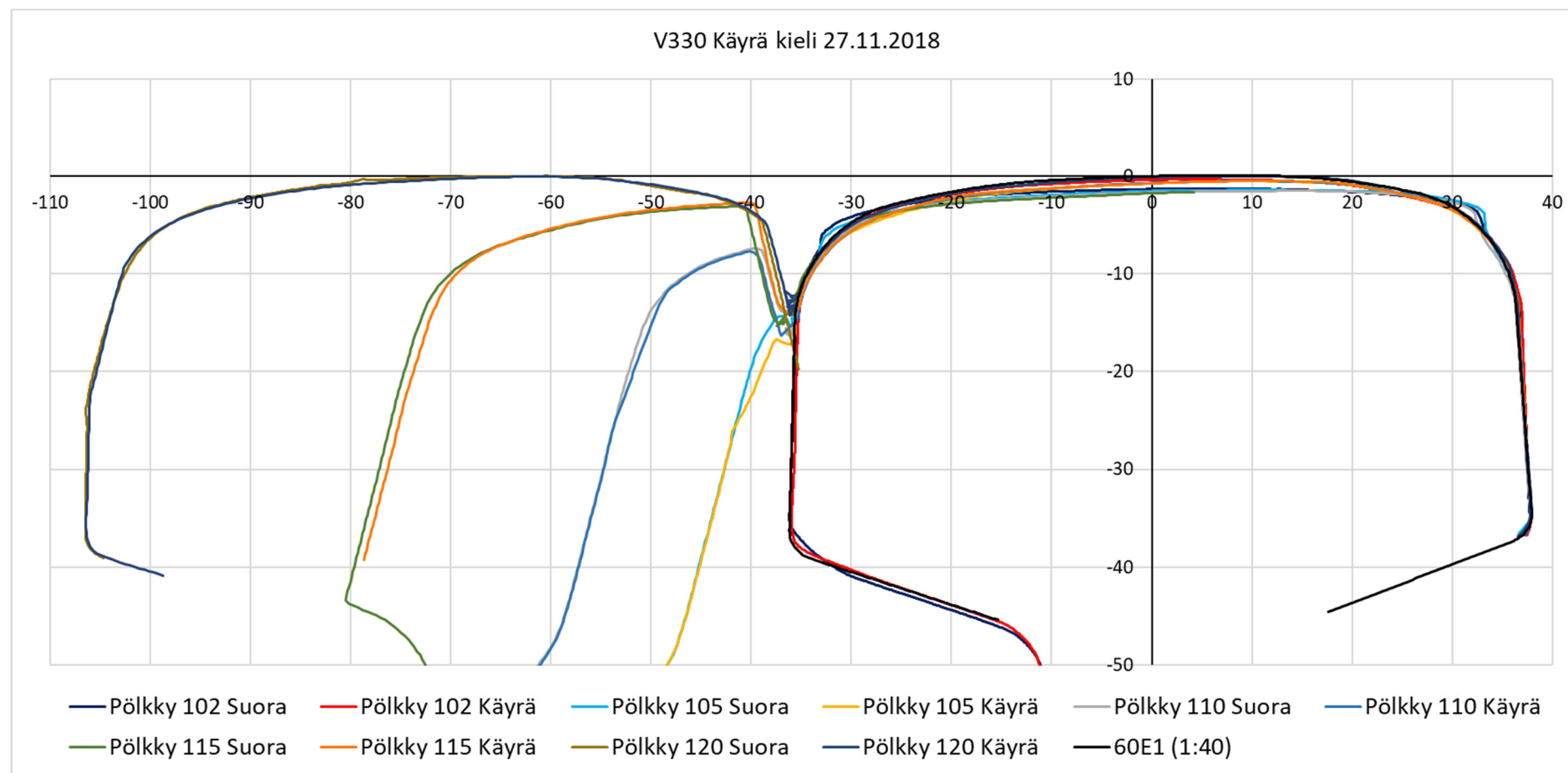




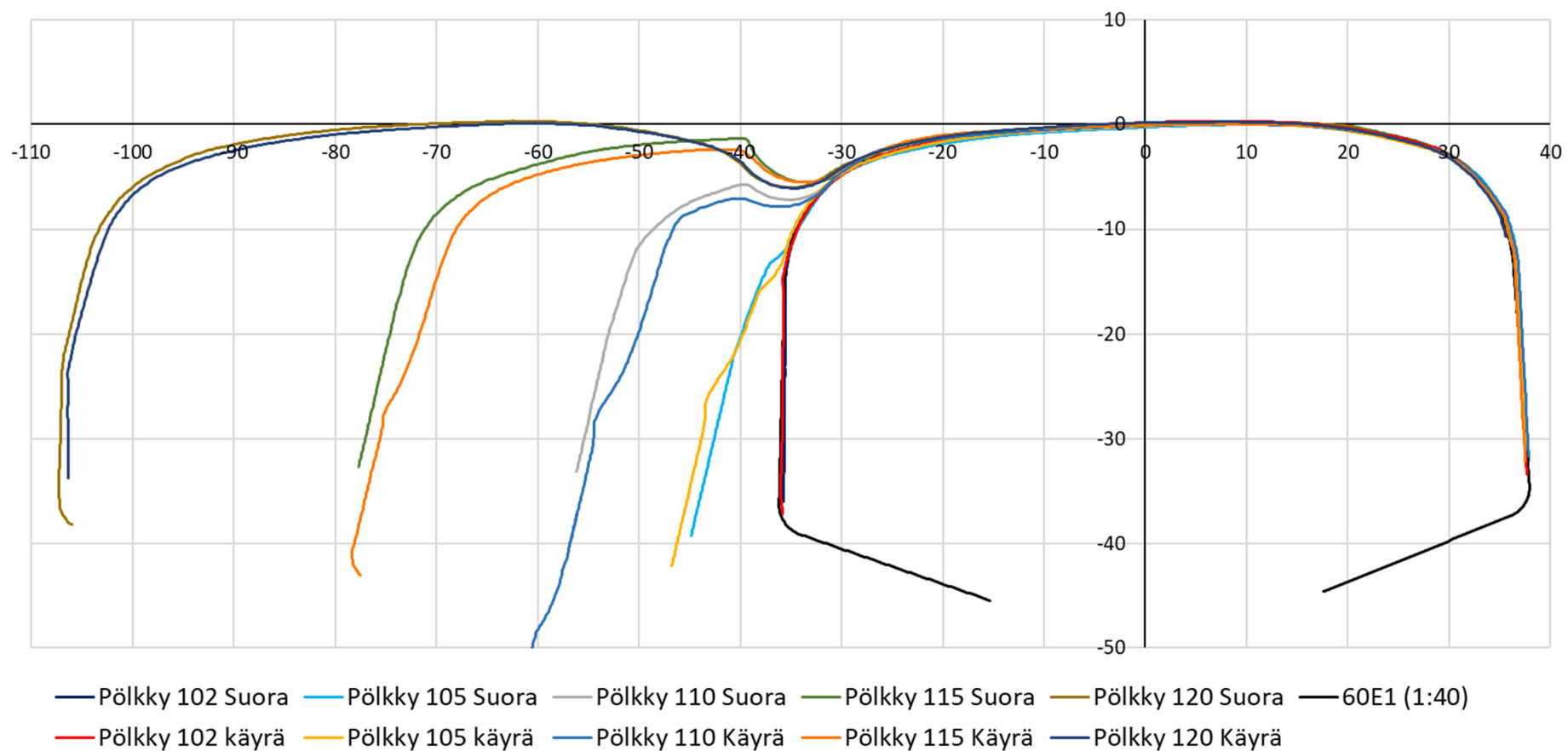


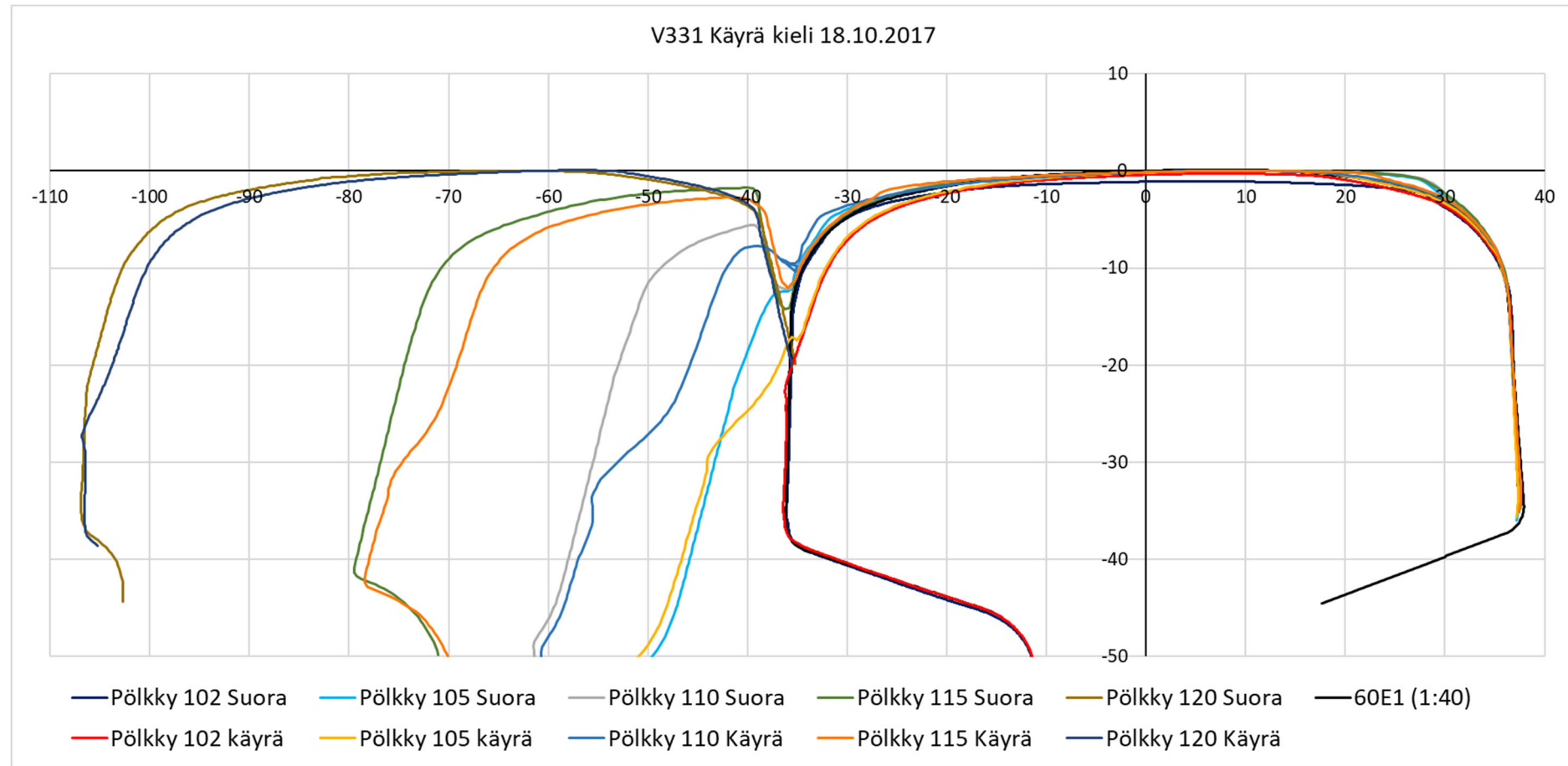


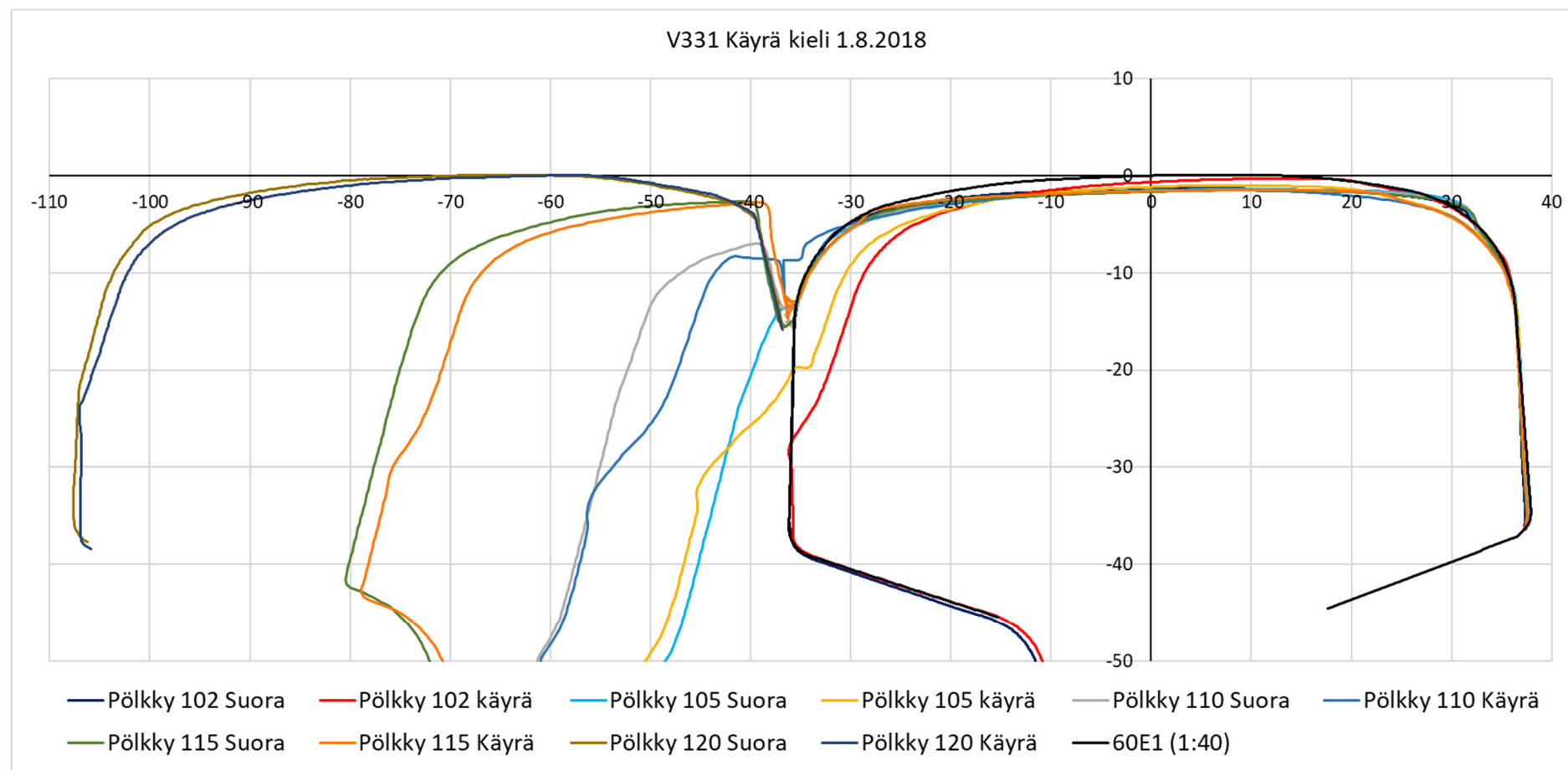


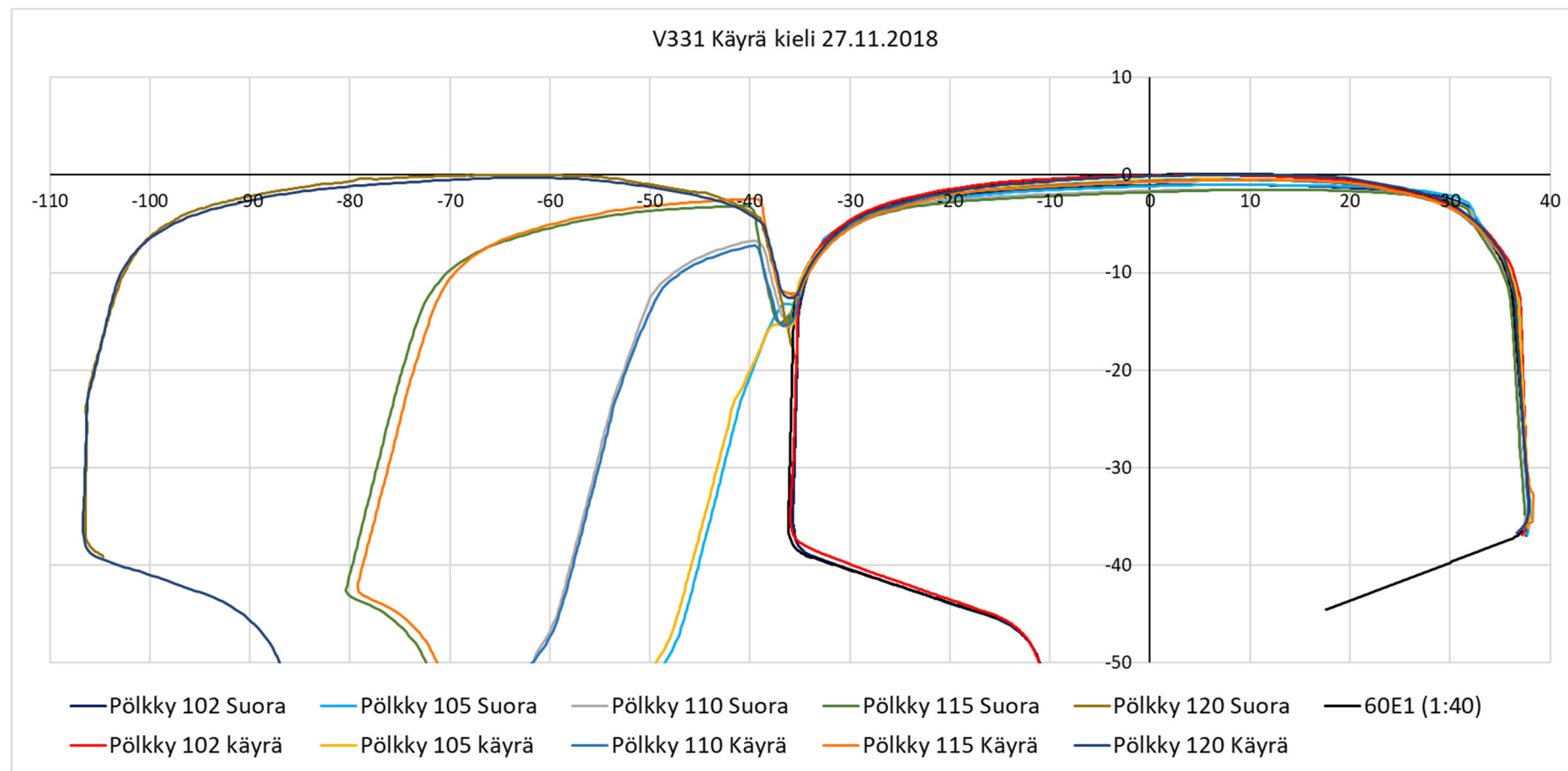


V331 Käyrä kieli 29.09.2016















ISSN 2490-0982  
ISBN 978-952-317-738-3  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)